



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Xochimilco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SALUD DE LOS TRABAJADORES

**ESTUDIO DE SALUD LABORAL EN UN SERVICIO DE MEDICINA NUCLEAR,
DISTRITO FEDERAL, 2012.**

**IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS
QUE PRESENTA**

MARILÚ ORTEGA ALMANZA

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN SALUD DE LOS TRABAJADORES**

**DIRECTORES: DR. JESÚS GABRIEL FRANCO ENRÍQUEZ
DR. ENRIQUE GAONA**

NOVIEMBRE, 2013

Agradecimientos

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades como el desarrollo de una tesis, te muestra inmediatamente que la magnitud de este aporte hubiese sido imposible sin la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para expresar mi agradecimiento.

Debo agradecer de manera especial y sincera al Dr. Jesús Gabriel Franco Enríquez y al Dr. Enrique Gaona por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigadora. Las ideas propias, siempre enmarcadas con su orientación y rigurosidad, han sido la clave del buen trabajo que hemos realizado juntos, el cual no se puede concebir sin su siempre oportuna participación.

A mis padres y a mi esposo, con todo mi cariño y amor porque son las personas que creyeron en mí e hicieron lo imposible para que yo pudiera lograr mis sueños, además siempre estuvieron impulsándome en los momentos difíciles y me dieron su apoyo incondicional, gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A mis maestros de la Maestría en Ciencias en Salud de los Trabajadores que influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme para los retos que pone la vida. A ustedes les dedico cada una de las páginas de mi tesis.

Le agradezco también a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco y a CONACYT el haber facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

Introducción.....	1
 Capítulo 1. Conceptos fundamentales de la investigación	
1.1 Trabajo.....	7
1.2 Proceso de trabajo.....	10
1.3 Salud Laboral.....	12
1.4 Otros conceptos.....	15
 Capítulo 2. Fundamentos físicos y biológicos en la práctica de la medicina nuclear	
2.1 Principios de física y medicina nuclear.....	20
2.2 Magnitudes y unidades.....	31
2.3 Detección y medida de la radiación.....	35
2.4 Principios de protección radiológica.....	41
2.5 Biología de la radiación.....	54
2.6 Características de los radioisótopos usados en medicina nuclear.....	68
2.7 Diagnóstico y tratamiento de enfermedades.....	72
 Capítulo 3. Estructura y funcionamiento de los servicios de medicina nuclear	
3.1 Licencias y permisos.....	84
3.2 Características de organización, funcionamiento y protección radiológica que deben cumplir los servicios de medicina nuclear de acuerdo a la legislación vigente.....	90
3.3 Aspectos de seguridad e higiene en el trabajo que deben cumplir los servicios de medicina nuclear de acuerdo a la legislación vigente.....	95
3.4 Situación actual de la práctica de la medicina nuclear en el cumplimiento de la normatividad.....	101
3.5 Manual de procedimientos de protección radiológica y protección civil, contenidos generales.....	104
 Capítulo 4. El proceso de trabajo de la medicina nuclear	
4.1 Riesgos y exigencias de la medicina nuclear.....	111
4.2 Daños a la salud en medicina nuclear.....	113

Capítulo 5. Evaluación de la estructura y funcionamiento de un servicio de medicina nuclear y su impacto en la salud laboral.

5.1 Metodología.....	124
5.2 Resultados.....	131
5.2.1 Cedula de Información General de la Empresa.....	131
5.2.1.1 Identificación de la empresa.....	131
5.2.1.2 Datos del personal.....	131
5.2.1.3 Jornada laboral.....	132
5.2.2 Diagramas Complejos de Salud en el Trabajo.....	134
5.2.2.1 Diagrama de flujo del proceso de trabajo.....	134
5.2.2.2 Descripción del diagrama de flujo del proceso de trabajo..	135
5.2.2.3 Cuadro de resumen del diagrama complejo de salud en el trabajo.....	137
5.2.3 Cuestionario de Verificación.....	141
5.2.3.1 Gráficas.....	143
5.2.3.2 Hoja de resultados.....	146
5.3 Conclusiones.....	147
5.4 Recomendaciones.....	150
 Conclusiones.....	 154
 Referencias Bibliográficas.....	 157

En la actualidad, dado el incremento continuo en el empleo de servicios de medicina nuclear, su estudio resulta de suma relevancia. De acuerdo con un reporte (2007) del Comité Científico de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR, por sus siglas en inglés), se calcula que anualmente se realizan en el mundo 32.7 millones de pruebas de diagnóstico a través de medicina nuclear, lo cual representa un aumento de alrededor de 64 mil (0.2%) exámenes al año (ONU, 2008). Solo en México, durante el periodo de enero a diciembre de 2011, se llevaron a cabo aproximadamente 830 mil estudios, tanto en pacientes ambulatorios como hospitalizados, a nivel nacional (IMSS, 2011).

Además de su uso en el área de diagnóstico, la medicina nuclear también se emplea en el tratamiento de algunas enfermedades y en la realización de investigaciones médicas, lo cual exige contar con un equipo complejo, instalaciones debidamente diseñadas con medios óptimos para el manejo de desechos, así como contemplar las medidas necesarias para la protección contra las radiaciones (Núñez, 2008).

Sin duda, la medicina se ha beneficiado con las propiedades de la radiación; las aplicaciones de las radiaciones ionizantes son innumerables en la industria, la investigación y el área médica (Dobson, 1964). Específicamente, la medicina nuclear constituye uno de los avances tecnológicos más destacados en beneficio de la humanidad. No obstante, debido a que esta tecnología utiliza fuentes radiactivas para diagnóstico (gammagrafía, PET, SPECT), su equipo e instalaciones implican posibles riesgos de irradiación externa y/o contaminación interna y externa (Arámburu, 1996).

Por lo anterior, las condiciones de la infraestructura del lugar de trabajo constituyen un elemento de gran importancia en el óptimo desarrollo de los procesos que involucran al personal

ocupacionalmente expuesto (POE), pues las deficiencias en este aspecto pueden provocar riesgos y exigencias con repercusiones en la salud de los trabajadores.

El buen funcionamiento de los servicios de medicina nuclear requiere personal capacitado, así como revisiones periódicas para asegurar que los equipos e instalaciones de alta tecnología se encuentren en condiciones adecuadas que garanticen la seguridad del POE, los pacientes y el público en general (STPS, 1997).

Para analizar los riesgos biológicos en un servicio de medicina nuclear, es necesario conocer su funcionamiento, las condiciones de sus instalaciones y el cumplimiento de los requerimientos legales con el fin de establecer un sistema de evaluación y control que permita evitar la exposición de los trabajadores a las radiaciones de tipo ionizante que se manejan en este servicio.

En el sector salud, las radiaciones ionizantes constituyen una herramienta fundamental para el diagnóstico y el tratamiento de ciertas enfermedades. Es sabido que el efecto primordial de la interacción de las radiaciones con la materia consiste en un fenómeno de ionización (OMS, 2010). La partícula ionizada transporta energía cinética que se agota a lo largo de su trayecto en la materia viva. Este proceso de ionización puede ser de forma directa o indirecta —como se explica en el capítulo 2—; su efecto nocivo es generado por la aparición de radicales libres y otros agentes altamente oxidantes que producen cambios químicos en el material genético a nivel celular. Es decir, los riesgos biológicos relacionados con este tipo de radiaciones son una consecuencia directa del proceso de ionización.

La peligrosidad de la radiación ionizante es directamente proporcional a su poder de penetración, es decir, a mayor capacidad de penetración, mayores serán los riesgos a su exposición. La radiación alfa recorre una distancia muy pequeña y puede ser detenida por una hoja de papel o la piel del cuerpo humano; en cambio, la radiación beta recorre una distancia en

el aire de, aproximadamente, un metro, y es obstaculizada por algunos centímetros de madera o una hoja delgada de metal; y, finalmente, la radiación gamma, que recorre cientos de metros en el aire, es frenada por paredes gruesas de plomo, cemento u hormigón. Todos estos tipos de radiaciones son utilizados en los servicios de medicina nuclear para fines de diagnóstico. (Cherry, 2001).

El conocimiento de las propiedades de las radiaciones conforma la base de los requerimientos legales de nuestro país relacionados con la utilización de material radiactivo, a través de estos se establecen las medidas de protección radiológica mínimas necesarias para una instalación radiactiva y mecanismos para controlar las óptimas condiciones del lugar de trabajo por medio de verificaciones basadas en dicha normatividad, todo ello con el fin de evitar daños a la salud de los trabajadores.

Los servicios de medicina nuclear, como cualquier otra área del sector salud que desee ocupar una posición de calidad competitiva, debe acatar a las medidas y reglas normativas que en materia de salud laboral prevalecen tanto a nivel nacional como internacional, a fin de establecer un ambiente laboral ideal a través del mejoramiento de las condiciones de trabajo y la minimización de riesgos y costos (Noriega et al, 2004). El ámbito de la medicina nuclear debe cumplir, específica y cabalmente, con la normatividad vigente de nuestro país en materia nuclear a fin de mantener la salud del trabajador, pues los daños detectados evidencian claramente una falta de conocimiento sobre el campo de la salud laboral, así como representan pérdidas humanas, económicas y sociales (Franco, 2003). Por ello, el estudio de las condiciones y medio ambiente de trabajo resulta fundamental para el desarrollo del sector salud.

El Reglamento General de Seguridad Radiológica (RGSR) establece que las autoridades o directivos de cualquier instalación radiactiva, como es el caso de la medicina nuclear, deben desarrollar acciones permanentes de seguimiento de la actividad preventiva y reconocimiento de

riesgos en el establecimiento con el fin de perfeccionar las actividades de identificación, evaluación y control de riesgos y efectos potenciales; asimismo deben dar continuidad a las actividades de protección existentes y mantenerlas actualizadas (V. Capítulo 3). De acuerdo con el reglamento, dichas autoridades deben fungir como responsables del fomento de la seguridad y salud laboral, su responsabilidad incluye proporcionar todas las herramientas necesarias al lugar de trabajo, lo cual es primordial para la implementación de medidas de prevención y la aplicación de modificaciones pertinentes a todos aquellos aspectos que incidan o afecten los procesos de trabajo (PE, 1917).

Dada la relevancia que el estudio de las condiciones y medio ambiente de trabajo tiene para el desarrollo del sector salud, así como ante la escases de estudios realizados en nuestro país en materia de salud laboral en servicios de medicina nuclear, la presente investigación pretende brindar datos confiables sobre este ámbito tan poco explorado.

Por ello, el objetivo general de esta investigación consiste en *evaluar el servicio de medicina nuclear de un hospital del tercer nivel de atención, perteneciente al sector salud, ubicado al norte de la ciudad de México, respecto a los requerimientos legales en materia en salud y seguridad laboral con la finalidad de mejorar las condiciones y el medio ambiente de trabajo.*

Asimismo, integra los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un recorrido general en el servicio a evaluar para el reconocimiento inicial de las instalaciones y observar las condiciones en las que se desarrolla el proceso de trabajo.
2. Detectar los problemas potenciales de salud de los trabajadores a partir de la reconstrucción de los procesos de trabajo.

3. Verificar los requerimientos legales con los que cuenta dicho servicio en materia de medicina nuclear; así como las condiciones de trabajo y salud en que se desempeñan los trabajadores.
4. Realizar un diagnóstico preliminar del área de medicina nuclear, a fin de obtener el panorama global de las condiciones en que se encuentra dicha área.
5. Elaborar una propuesta de medidas preventivas de salud laboral en el lugar de trabajo.

El estudio se halla dividido en cinco capítulos, el primero, *Conceptos fundamentales de la investigación*, presenta las principales consideraciones sobre los conceptos de trabajo, proceso de trabajo y salud laboral, los cuales constituyen la base teórica de la investigación. Se trata de un apartado completamente expositivo que intenta poner de manifiesto la importancia de dichos conceptos en materia de la salud laboral.

El segundo capítulo, que lleva por título *Fundamentos físicos y biológicos en la práctica de la medicina nuclear*, nos acerca de manera básica a la física y la medicina nuclear, expone sus características técnicas y su terminología. Asimismo, se presentan los aspectos generales referidos a las radiaciones ionizantes como magnitudes, detección y radiobiología. También se abordan los radioisótopos utilizados en esta especialidad; las características del diagnóstico y tratamiento en dicho servicio; y las medidas vigentes en materia de protección radiológica cuyo incumplimiento deriva en la pérdida de la salud de los trabajadores.

El tercer capítulo, *Estructura y funcionamiento de los servicios de medicina nuclear*, muestra el contexto legal que deben cubrir los servicios de medicina nuclear para su actividad en términos de normatividad nuclear, seguridad e higiene. Asimismo, se plantea la situación actual en la que se encuentra la especialidad y los requerimientos mínimos que debe contener el manual de seguridad radiológica.

El proceso de trabajo de la medicina nuclear integra el cuarto capítulo, el cual nos adentra en el campo de las actividades que se realizan en los servicios de medicina nuclear; los riesgos y las exigencias a los que se halla expuesto el POE; e integra una revisión de artículos sobre daños a la salud y exposición de los trabajadores a las radiaciones ionizantes.

Por último, el capítulo cinco, *Evaluación de la estructura y funcionamiento de un servicio de medicina nuclear y su impacto en la salud laboral*, presenta la metodología, los resultados y las conclusiones derivadas del trabajo de campo.

Capítulo 1. Conceptos fundamentales de la investigación

Este capítulo tiene como objetivo conocer los principales conceptos en los que se basa la investigación. En el primer apartado se aborda la definición y origen etimológico del término trabajo, su importancia desde tiempos remotos, así como se establecen sus definiciones generales en los ámbitos económico y jurídico, las cuales sirven para delinear el concepto de trabajo desde el punto de vista de la salud de los trabajadores.

En el segundo término se expone la definición de proceso de trabajo y sus componentes desde el punto de vista de la salud laboral, así como su importancia en la vida del ser humano. Tras lo cual, en una tercera sección se plantea la definición de salud laboral a partir de distintos enfoques: desde el punto de vista de la Organización Mundial de la Salud, la Epidemiología Laboral y, finalmente, aquella conceptualización más pertinente para fines de nuestra investigación.

Como parte de los fundamentos de este estudio, también se presentan los conceptos de verificación y diagnóstico, entre otros.

1.1 El trabajo

Los conceptos que se exponen a continuación constituyen la base de nuestra investigación, por ello, iniciamos con el concepto de **trabajo**; no obstante, cabe aclarar que, de manera intencional, se excluye el pensamiento clásico de la medicina del trabajo que entiende el trabajo como un problema ambiental en tanto coloca al trabajador en contacto con agentes químicos, físicos, biológicos y psicológicos que le causan accidentes o enfermedades. Esta conceptualización, reproduce la forma tradicional de la medicina que ve la enfermedad como un fenómeno biológico que ocurre en el individuo.

Por consiguiente, partiremos de la concepción que define al trabajo como la actividad sustancial del hombre, su fuente de bienestar y desarrollo; sin embargo, de manera paradójica, también es generador de daños a la salud humana. Este último aspecto, el efecto nocivo del trabajo sobre la salud de los trabajadores, ha sido registrado desde tiempos remotos según puede apreciarse en evidencia documental como el Código de Hammurabi, el Papiro de Ebers y las obras de Plinio el viejo, Heródoto e Hipócrates, entre otros, en las que se consignan descripciones de enfermedades frecuentes entre diferentes tipos de trabajadores como obreros de la construcción, agricultores, panaderos, mineros, curtidores, etc. (Lain, 1983).

Ahora bien, el origen etimológico de la palabra *trabajo* es incierto. Diversos autores señalan que proviene del latín *trabs*, *trabis*, que significa ‘traba’, pues el trabajo representa un obstáculo o un reto para los individuos al siempre llevar implícito un esfuerzo determinado. Otros autores ubican su raíz en la palabra *laborare* o *labrare*, ‘labrar’, término relativo a la labranza de la tierra. Algunos más señalan que proviene del griego *thilbo*, concepto que denota la acción de apretar, oprimir o afligir (Sabino, 2005).

Para fines de nuestra investigación, entendemos como trabajo al medio mediante el cual el hombre produce bienes para satisfacer sus necesidades (Noriega, 1989), es decir, el trabajo es la actividad humana cuyo objetivo consiste en crear satisfactores y que se halla inscrita en un marco legal regulador de su vinculación y funcionamiento con los demás factores de la producción.

Cabe mencionar que la conceptualización del trabajo también es delineada desde las perspectivas económica y jurídica (Hurtado, 2005). La primera, establece que el trabajo es concebido como un factor de la producción, representado por la actividad humana, aplicado a la producción de bienes y servicios, y cuya retribución se denomina salario (Rosenberg, 2001). Por otro lado, en el ámbito jurídico, de acuerdo con la Ley Federal del Trabajo en su artículo tercero: “El trabajo es un derecho y un deber sociales. No es artículo de comercio, exige respeto a las

libertades y la dignidad de quien presta sus servicios y debe efectuarse en condiciones que aseguren la vida, la salud, y un nivel económico decoroso para el trabajador y su familia”.

Asimismo, el artículo octavo de dicha Ley establece que “trabajo es toda actividad humana, intelectual o material, independientemente del grado de preparación técnica requerido por cada profesión u oficio” y señala que con el término trabajador se define a toda “persona física que presta a otra, física o moral, un trabajo personal subordinado” (Trueba, 2010).

Por su parte, el Derecho laboral enfatiza la necesidad de proteger adecuadamente al trabajador en los ámbitos sociales, económicos y políticos; así como de ordenar las relaciones individuales y colectivas entre empresas y trabajadores para alcanzar un equilibrio entre los intereses de ambas partes mediante la enunciación precisa de sus derechos y deberes (Vega, 2001).

Podemos decir entonces que a través del trabajo las personas satisfacen sus necesidades. Una comunidad mejora el nivel de salud de su población cuando asegura que todas las personas capaces de trabajar, puedan acceder a un empleo que satisfaga, no solo sus necesidades económicas básicas, sino también que cumpla positivamente con otros aspectos como: salario, actividad física y mental, contacto social, desarrollo de una actividad con sentido, entre otros. Asimismo, el trabajo requiere de la regulación e intervención legal para velar por los derechos fundamentales de los empleados, así como para disponer mecanismos capaces de controlar los riesgos y exigencias derivados de sus actividades laborales que garanticen la protección del trabajador y su familia, es decir, la previsión social.

Por todo lo anterior, debido al daño que puede ocasionar la radiación empleada en los servicios de medicina nuclear, es necesario impedir las exposiciones innecesarias, el RGSR fija las recomendaciones de las dosis máximas que pueden recibir los trabajadores cuya actividad los lleva a estar expuestos a la radiación. Por ello, en cualquier instalación radiactiva, los empleados

deben de ser protegidos a través de la aplicación de los principios de protección radiológica (tiempo, distancia y blindaje) y el sistema de limitación de dosis (justificación, limitación de dosis y optimización-ALARA), que se traduce en minimizar las exposiciones a un margen razonablemente posible.

Si bien para los servicios de medicina nuclear existe una normatividad específica, para garantizar la protección de los trabajadores, es menester que esta sea cumplida; asimismo, es indispensable que los procedimientos de seguridad sean aplicados cabalmente y que exista una supervisión rigurosa de la autoridad reguladora a fin de fomentar un ambiente de trabajo seguro y óptimo.

1.2 Proceso de trabajo

El concepto de **proceso de trabajo** es fundamental para comprender el trabajo, pues forma parte imprescindible de sus componentes.

El proceso de trabajo es un elemento básico que debe ser evaluado en cualquier sistema productivo, sobre todo en pequeñas empresas productoras de bienes que no suelen otorgar la importancia necesaria a este elemento (Hernández, Almirall, & Franco, 2005). Cabe mencionar que en el sector salud este elemento es poco reconocido o desconocido a pesar de ser esencial para el desarrollo del trabajo.

Pues bien, el proceso de trabajo se define como una actividad racional de intercambio de materias entre la naturaleza y el hombre, a través de la cual este se apropia los elementos que aquella le ofrece y los transforma con la finalidad de obtener los medios necesarios para su existencia. A la vez, en el mismo proceso, el hombre también se transforma: desarrolla su propia naturaleza, sus músculos, su capacidad de pensar y crear (Marx, 1975).

La actividad económica dirigida a la producción de bienes para la satisfacción de necesidades es inherente a la vida del ser humano. Sin embargo, para fines de esta investigación se entiende como proceso de trabajo *la generación de bienes para la satisfacción de las necesidades humanas*, el cual se compone de cuatro elementos: objeto de trabajo; medios de trabajo; el trabajo en sí mismo; y la organización y división del trabajo (Noriega, 1989). El proceso de trabajo requiere de su evaluación, pues de esta forma es posible conocer integralmente la manera en que se realiza el trabajo.

Ahora bien, por **objeto de trabajo** se entiende todo elemento, materia prima o bruta, sobre el que se actúa para transformarlo en un producto final. Los **medios de trabajo** definen los componentes empleados que permiten transformar el objeto en producto, es decir, son el vehículo de la acción del trabajo sobre dicho objeto. Por su parte, **la organización y división del trabajo** se refieren a la forma de concepción y ejecución del mismo, así como a su distribución técnica o las diferentes etapas del proceso, lo cual depende de los mecanismos a través de los que se sistematizan las actividades de los trabajadores y se regula el funcionamiento de los objetos y medios de trabajo (Noriega, 1989).

Los elementos del proceso de trabajo antes descritos son indispensables para el reconocimiento de posibles daños a la salud de los trabajadores. Así, entendemos como **riesgo** a *los elementos potencialmente nocivos derivados de los objetos y medios de trabajo*; y como **exigencias** a *los elementos potencialmente nocivos derivados del trabajo en sí mismo y la organización y división del trabajo* (Noriega, 1989). La identificación oportuna de los aspectos que generan riesgos y exigencias permite implementar programas adecuados y específicos de seguridad e higiene para los trabajadores.

En el caso específico del personal de los servicios de medicina nuclear, su actividad parece limitada a realizar estudios para el diagnóstico de enfermedades sin considerar la

necesidad de establecer una relación directa y permanente entre el proceso de trabajo y su impacto en la salud; por ello, la identificación oportuna de los riesgos y exigencias derivados del proceso de trabajo es fundamental en la conformación de un ambiente laboral seguro para los trabajadores.

1.3 Salud laboral

Antes de ocuparnos del ámbito de la salud laboral o salud en el trabajo, resulta vital abordar diferentes perspectivas del concepto de salud y asentar qué se entiende por salud en este documento, pues en la práctica de la medicina nuclear y, de acuerdo a la legislación vigente en materia nuclear, de debe prevenir el deterioro de la salud de los trabajadores y mejorar las condiciones de trabajo de las instalaciones donde se manejan radiaciones ionizantes.

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS), *salud* no se refiere únicamente a la ausencia de enfermedad, sino al estado de completo bienestar biológico, mental y social.

Por otro lado, en la visión patronal, la salud es, exclusivamente, la posibilidad de que los trabajadores puedan laborar; considera la enfermedad solo cuando el trabajador pierde la capacidad de realizar su trabajo y lo identifica como sano mientras puede desarrollar sus actividades normalmente, sin importar si se siente mal o está enfermo, de manera que la enfermedad no se contrapone a la salud.

Ahora bien, la visión institucional define la salud de una manera simplista, por exclusión: es sano quien no está enfermo; la enfermedad es un trastorno biológico que se corrobora con algunas pruebas. La consigna consiste en no admitir simuladores, pues se debe demostrar, de manera fidedigna, que se está enfermo. Las instituciones son las encargadas de definir quién está enfermo y quién esta sano; quién padece una enfermedad profesional y quién amerita incapacidad (Noriega, 1993).

Una vez establecida la conceptualización adecuada para los fines que nos ocupan, podemos abordar el ámbito de la salud en el trabajo, el cual exige, por un lado, el conocimiento general de los procesos de trabajo; y por otro, la comprensión de su campo de acción y las áreas de estudio que involucra.

En 1995, el Comité Mixto OIT/OMS estableció los siguientes objetivos de esta disciplina: promoción y mantenimiento del más alto grado de bienestar físico, mental y social de los trabajadores en todas las profesiones; prevención de la pérdida de la salud derivada de las condiciones de trabajo; protección de los trabajadores en su empleo contra los riesgos derivados de factores adversos para la salud; y colocación y mantenimiento del trabajador en un ambiente de trabajo adaptado a sus capacidades fisiológicas y psicológicas.

Por su parte, la epidemiología laboral define la salud laboral como la disciplina encargada del estudio de las causas, las determinantes, las diferentes distribuciones del perfil salud-enfermedad y las propuestas y controles para transformarlas.

En su concepción más amplia, la salud laboral constituye un área compleja del conocimiento que se encarga del estudio integral del proceso de trabajo y su relación con la salud de los trabajadores, para lo cual se apoya en disciplinas como la seguridad, higiene, ecología, protección civil, psicología, ergonomía y medicina del trabajo, entre otras. Asimismo, cuantifica los fenómenos del estudio, área cuyo fundamento y marco explicativo se ubican en el ámbito económico, político e histórico de los grupos sociales involucrados (Franco, 1998).

Así, toda empresa o institución debe atender a consideraciones relativas a la salud laboral, no obstante, para aquellas que forman parte del sector salud esta es una premisa prioritaria y fundamental. Debemos señalar que cuando nos referimos al sector salud, hablamos del conjunto de valores, normas, instituciones y actores que desarrollan actividades de producción, distribución y consumo de bienes y servicios cuyos objetivos principales o exclusivos son

promover la salud individual o de grupos de población. Quienes se desempeñan en este sector son denominados trabajadores de la salud, esto es, toda persona que presta un servicio personal, intelectual o material, en forma remunerada en régimen de subordinación, en un servicio de salud público o privado (OMS, 2010).

Ahora bien, en el sector salud la prestación de los servicios implica procesos, operaciones y materiales que, en mayor o menor medida, crean riesgos para la salud del personal y el ambiente en que se desarrolla; por ello, para evaluar y mejorar las condiciones de trabajo es fundamental considerar a la Higiene, entendida esta como la ciencia y el arte dedicados al reconocimiento, evaluación y control de aquellos factores ambientales o tensiones provocadas por el lugar de trabajo, que pueden tanto ocasionar enfermedades, destruir la salud y el bienestar, como generar algún malestar significativo entre los trabajadores e, incluso, en los pacientes y visitantes.

Asimismo, otro aspecto prioritario que se debe tomar en cuenta al hablar de salud laboral es la seguridad, esencial para conocer las repercusiones del proceso de trabajo en el personal del sector salud (Manual de Higiene Industrial, 1996). En este sentido, la seguridad es vista como el conjunto de técnicas que permiten reconocer, evaluar y controlar aquellos factores, principalmente mecánicos, presentes en el ambiente de trabajo (herramienta, maquinaria, pisos, escaleras, etc.) que pueden producir accidentes de trabajo.

En el caso específico de los servicios de medicina nuclear, es importante diferenciar el concepto de seguridad antes mencionado, del correspondiente a protección radiológica cuyo objetivo consiste en asegurar un nivel apropiado de protección al hombre y al medio ambiente sin limitar de forma indebida las prácticas beneficiosas de la exposición a las radiaciones. Para alcanzar dicho objetivo no basta con la aplicación de medidas es carácter científico; es necesario establecer normas que garanticen la prevención de la incidencia de efectos biológicos

deterministas (manteniendo las dosis por debajo de un umbral determinado) y la aplicación de todas las medidas razonables para reducir la aparición de efectos biológicos estocásticos a niveles aceptables (ICPR, 2010).

Debido a que los procedimientos de protección radiológica representan medidas básicas para la conservación del ambiente y la preservación de la salud de los trabajadores y los pacientes, resulta indispensable que los servicios de medicina nuclear apliquen las disposiciones necesarias en Protección Radiológica, así como que cuenten con un Manual de Procedimiento de Seguridad Radiológica que dé cumplimiento a la normatividad nuclear vigente.

A pesar de que el sector hospitalario recluta a un gran número de trabajadores, no ha dado la suficiente importancia a la salud laboral del personal. Esta situación afecta de igual manera a los servicios de medicina nuclear que tienden a subestimar o desconocer los riesgos presentes en el lugar de trabajo, o bien, estos se juzgan ajenos a su personal; pareciera que tanto para las autoridades, como para los trabajadores, la necesidad inminente consiste en elevar la calidad de los servicios para mejorar la atención al paciente sin considerar prioritario el cuidado de las condiciones de trabajo y la salud del personal.

Lo anterior conduce a que las normas de calidad, seguridad, salud y gestión ambiental se tornen más exigentes y su cumplimiento cada vez más necesario en las instituciones de salud. En este sentido, la implementación de modelos que evalúen el apego a dicha normatividad nos permite mantener y mejorar las condiciones de trabajo.

1. 4 Otros conceptos relevantes

Los modelos de evaluación no han tenido gran impacto en el sector salud, ya que, como hemos mencionado, este sector no ha priorizado el tema de la salud laboral; no obstante, la importancia de los modelos de evaluación como herramienta de estudio en el campo de la salud

laboral consiste en que esta representa una construcción intelectual que simplifica la realidad a fin de detectar lo recurrente, lo general y lo típico que se presenta en forma de conjuntos de características o de atributos (Franco, 2006).

Ahora bien, un aspecto fundamental de los modelos de evaluación se halla constituido por la **verificación**, es decir, la revisión exhaustiva, cíclica y permanente realizada mediante de la observación directa y el examen documental para cuantificar la eficacia de la empresa en materia de salud en el trabajo (Franco, 1998).

En medicina nuclear la verificación influye de manera importante, pues el seguimiento y la supervisión rigurosa de los procedimientos son vitales para propiciar un ambiente laboral óptimo a través de la revisión y examen de la información proporcionada a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) con motivo de las actividades reguladas por el Reglamento General de Seguridad Radiológica y de acciones correctivas derivadas de las deficiencias o anomalías que, como consecuencia de las inspecciones o auditorías, pudieran encontrarse.

Otro elemento primordial de los modelos de evaluación es el **diagnóstico**. En el campo de la salud la palabra diagnóstico se refiere al arte o acto de conocer la naturaleza de una enfermedad mediante la observación de sus síntomas y signos; sin embargo, como herramienta de investigación, el diagnóstico se entiende como el procesamiento y análisis de los resultados de la verificación que sirve a la elaboración de conclusiones y recomendaciones que permitan implementar una propuesta de intervención acorde a las necesidades y expectativas de la empresa (Franco, 1998).

Por todo lo anterior, este estudio emplea el modelo PROVERIFICA, utilizado para obtener el diagnóstico integral de las condiciones laborales, así como los riesgos y efectos

potenciales a los que están expuestos los trabajadores en las empresas (Franco, 2003), en nuestro caso en un servicio de medicina nuclear.

Para la interpretación de datos, el modelo PROVERIFICA emplea los términos **índice** y **porcentaje de eficacia**. El primero está constituido por la síntesis de varias expresiones numéricas, corresponde a la reconstrucción de un concepto original en el que a cada dimensión le son asignados diversos indicadores (preguntas); el porcentaje de eficacia es la fuerza, capacidad o fortaleza que tiene una empresa para resolver sus problemas de salud en el trabajo (Franco, 2003), es decir, en este caso, la capacidad que tiene el servicio de medicina nuclear para aplicar cabalmente la normatividad vigente traducida en los procedimientos internos solicitados por la autoridad reguladora en nuestro país, a saber, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

Por último, y en otro orden de ideas, abordamos algunos conceptos fundamentales para la comprensión de la terminología relacionada con la medicina nuclear y en materia de la radiación.

En primera instancia, cabe señalar que la OMS define a la medicina nuclear como la especialidad médica que, con fines asistenciales, docentes o de investigación, emplea fuentes radiactivas no encapsuladas a fin de obtener imágenes mediante la detección de radiación emitida por una sustancia radiactiva previamente suministrada al paciente por vía intravenosa u oral con fines preventivos o de investigación médica.

Esta área de la medicina emplea en sus procesos radiofármacos formados por un fármaco transportador y un isótopo radiactivo con fines diagnósticos y terapéuticos. La radiación ionizante, de acuerdo con la NOM-012-STPS-2012, se entiende como toda radiación electromagnética o corpuscular capaz de producir iones, directa o indirectamente, debido a su interacción con la materia.

Por ello, resulta inevitable que los isótopos radiactivos que se utilizan en medicina nuclear penetren en el organismo y aunque los seres humanos expuestos a dosis pequeñas de radiación pueden no presentar ningún efecto biológico inmediato, ni aparente, no hay duda de que la radiación ionizante, cuando es mayor a la dosis umbral, provocará efectos biológicos deterministas —como muerte celular másica dependiente de la dosis—; asimismo, en dosis bajas se pueden manifestar efectos estocásticos tras un periodo de latencia, caso de los trabajadores del servicio de medicina nuclear que manejan radiaciones en su proceso de trabajo (Sánchez, 2011).

Capítulo 2. Fundamentos físicos y biológicos en la práctica de la medicina nuclear

En este capítulo se exploran las bases en física nuclear, así como los datos técnicos de la medicina nuclear y los principios de protección radiológica que dan sustento a este estudio.

En el primer apartado se expone de manera general del término átomo; se abordan las características físicas de la radiación atómica; sus fuentes naturales y artificiales; así como se plantea la definición de los radioisótopos y sus principales generadores.

En la segunda sección se presentan los aspectos básicos de las unidades y magnitudes radiológicas (dosimétricas, con respecto a la radiactividad y protección radiológica) a partir de la descripción general establecida por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación, ICRU.

El tercer apartado sirve para describir los métodos más utilizados en la detección de la radiación ionizante en medicina nuclear —placa fotográfica, ionización de gases, centelleo, semiconductores, dosimetría personal y termoluminiscente—.

La cuarta sección, referente a principios de protección radiológica, expone los principios de esta disciplina —justificación, limitación de dosis y optimización— y los métodos para minimizar los daños de la radiación, es decir, distancia, blindaje y tiempo. Asimismo, describe la limitación de dosis de la exposición ocupacional y del público en general de acuerdo con el Reglamento General de Seguridad Radiológica, RGSR.

Por su parte, el quinto apartado presenta, de manera general, el término de biología de la radiación o radiobiología y las características generales de la célula; introduce una descripción de la clasificación de los efectos biológicos generados por las radiaciones ionizantes, así como los factores internos y externos que influyen en el daño. Finalmente, explica los efectos en cada uno de los aparatos y sistemas del organismo.

El concepto de radiofármaco, sus propiedades y sus aplicaciones en el campo médico (diagnóstico, tratamiento), así como aquellas empleadas en el estudio de los diferentes aparatos y sistemas del cuerpo humano se exponen en la sexta sección.

Por último, el séptimo apartado describe los métodos de diagnóstico in vivo e in vitro practicados en medicina nuclear; expone los procedimientos comunes que se realizan en dicho servicio, como: gammagrafía o centellografía, tomografía computarizada con emisión de fotón único, SPECT y tomografía por emisión de positrones, PET.

2.1 Principios de física y medicina nuclear

La idea referida a que la materia está compuesta y no es indefinidamente divisible es muy antigua. En la época griega ya se hablaba de átomos, partículas que fueron definidas con precisión en el siglo XIX tras el estudio cuantitativo de la materia. La concepción de que el átomo no constituye la partícula más pequeña de la materia hubo de esperar hasta finales de dicho siglo, mientras que el concepto del núcleo, como pequeño centro del átomo, surgió hasta la segunda década del siglo XX.

El término átomo proviene del latín *atomum*, y este del griego *ἄτομον*, ‘sin división’, derivado del prefijo *a*, ‘sin’ y *tomon* ‘corte’, división’. Se define como la unidad más pequeña de un elemento químico que posee su identidad o propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos.

Los átomos están constituidos por un núcleo formado por protones, partículas con carga eléctrica positiva, y neutrones, que no poseen carga eléctrica, en conjunto son denominados nucleones. En torno al núcleo, orbitan los electrones, partículas con carga eléctrica negativa que conforman la corteza atómica (Sharp et al, 2005). Cuando la cantidad de electrones iguala en

número a los protones, la carga eléctrica total del átomo es cero, es decir, es neutro; si el átomo no es neutro, significa que posee carga eléctrica y se denomina ión.

Un átomo con número definido de protones y neutrones se denomina nucleído; los átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones y, por lo tanto, difieren en masa atómica, son denominados isótopos. La mayoría de los elementos químicos tienen más de un isótopo. Solamente 21 elementos, por ejemplo el berilio y el sodio, poseen un único isótopo natural; en contraste, el estaño es el elemento con más isótopos estables.

En la naturaleza, gran parte de los núcleos atómicos son estables y se mantienen inmutables en el tiempo. Sin embargo, en el caso de aquellos que son inestables, como el uranio, los isótopos están en constante degradación, este fenómeno les confiere sus propiedades radiactivas, es decir, pueden emitir espontáneamente partículas cargadas, radiación electromagnética —fotones— o romperse en varios núcleos más pequeños, lo cual modifica su identidad. A estos núcleos se les llama radionucleídos o radioisótopos, pasan a su estado fundamental mediante la emisión de radiación, proceso conocido como desintegración radioactiva (Manual de Seguridad e Higiene, 1996).

Un isótopo posee mayor capacidad radiactiva, mientras mayor sea el número de transformaciones nucleares espontáneas en unidad de tiempo. El tiempo necesario para que la actividad de una sustancia radiactiva se reduzca a la mitad se denomina periodo de semidesintegración. Por ello, las radiaciones, como una forma básica de transferencia de energía de una fuente a otra, son tema de gran interés, no solo desde el punto de vista de la física, si no en el área de la medicina nuclear, ya que la radiación se emplea, por ejemplo, con fines diagnósticos en la gammagrafía mediante el uso de las interacciones de los rayos gamma que penetran a través de los diferentes tejidos y dan como resultado la obtención de una imagen; y con fines

terapéuticos, para la eliminación de tejidos malignos a partir de elementos radiactivos introducidos en el paciente.

La generación intencionada de radiaciones, como las arriba descritas, corresponden a la denominada *radiactividad artificial*, es decir, el hombre la produce como consecuencia de su actividad; no obstante, el ser humano ha coexistido a lo largo de los años con la presencia de radiaciones en su ambiente e, incluso, en su mismo cuerpo, esta es la *radiactividad natural* generada en la naturaleza. (Arámburu, 1996).

Fuentes de radiación natural. Como ya hemos mencionado, nuestra especie ha evolucionado en un entorno naturalmente radioactivo. El ser humano depende de numerosos factores de exposición naturales como son: radiación cósmica, radiactividad en la superficie de la tierra, el aire, el agua, el cuerpo humano y la precipitación radiactiva de las pruebas nucleares.

a) Radiación cósmica. El espacio exterior formado por el sistema solar y el constituido por otras galaxias y cuerpos celestes experimentan intercambios energéticos que tienen como consecuencia la emisión de partículas y radiaciones que alcanzan la atmósfera terrestre. Así, la radiación cósmica se halla integrada por partículas de origen extraterrestre dotadas de gran energía que interaccionan con los elementos constitutivos de la atmósfera.

Los rayos cósmicos pueden ser primarios y secundarios, si bien fuera del sistema solar el campo de este tipo de radiación es constante, aquella que pertenece a dicho sistema y la que penetra en la atmósfera sufre variaciones periódicas de intensidad de acuerdo con el ciclo solar, cuyo periodo comprende, aproximadamente, once años.

Los rayos cósmicos primarios corresponden a la radiación de alta energía que penetra en la atmósfera terrestre procedente del espacio exterior; su interacción con los elementos que forman parte de la atmósfera genera los rayos cósmicos secundarios. (Arámburu, 1996)

b) Radiación de materiales radiactivos que existen en la corteza terrestre. Los materiales se pueden encontrar en estado sólido o gaseoso, como en el caso del radón; estos se encuentran presentes en la cadena alimenticia humana, en el aire, el agua potable y los materiales de construcción. (Gaona, 1999)

Los principales radioisótopos terrestres, que contribuyen a la dosis que recibe un individuo y que dan lugar a muchos radionucleídos por fisión nuclear, provienen principalmente de las cadenas radiactivas del uranio (^{238}U y ^{235}U) y del torio (^{232}Th), donde la serie del uranio 235 (^{235}U) está compuesta por 17 radioisótopos; serie del uranio 238 (^{238}U), compuesta por 19 radioisótopos; y serie del torio 232 (^{232}Th) compuesta por 12 radioisótopos; todos ellos, conocidos por las siglas en inglés como NORM, *Naturally Occurring Radioactive Materials*.

Por su parte, las radiaciones de origen artificial se deben a las desintegraciones de los radionucleídos producidos en las reacciones nucleares generadas en dispositivos creados por hombre, como reactores nucleares, aceleradores de partículas, explosivos nucleares y tubos de rayos X. Para fines prácticos, se describirán brevemente algunos sistemas de generación de radiactividad artificial.

Como ya se ha comentado anteriormente, los mecanismos de producción de radioisótopos están basados en el principio de creación de núcleos inestables mediante reacciones nucleares de diversa índole. Los radioisótopos producidos son manipulados, transportados y almacenados, lo cual brinda diversas posibilidades para dispersar la radiactividad, con su consiguiente impacto radiológico sobre los seres vivos (Graef, 1996); su uso se extiende al campo de la medicina, la industria, la minería y la generación de energía térmica. Los principales sistemas de generación de productos radiactivos son:

- a) Reactores nucleares, se distinguen por su empleo en la experimentación y producción de radioisótopos, así como para la producción de energía.

- b) Aceleradores de partículas, son utilizados en la producción de radioisótopos para: diagnóstico y tratamiento de pacientes en medicina; irradiación de alimentos para su conservación; desarrollo de modificaciones estructurales en diversos materiales; e investigación básica, entre otros.

Cabe mencionar que en México, la actividad industrial radiactiva es reducida. Según el reporte anual de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), publicado a finales del 2010, nuestro país cuenta con dos reactores nucleares en funcionamiento cuya potencia estimada es de 1,300 megawatts (MW), los cuales, en 2008, suministraron electricidad por 9.4 terawatts, es decir, el 2.5% de la electricidad consumida en el país. México, con una experiencia operacional en reactores nucleares de 36 años, pertenece a los 151 miembros del organismo internacional de la IAEA (SEGOB, 2009).

Radiaciones ionizantes y no ionizantes. Las radiaciones, de acuerdo con la energía que poseen, pueden clasificarse ionizantes y no ionizantes. Estas últimas designan a la radiación electromagnética que no es capaz de producir —directa o indirectamente— iones a través de su paso por la materia comprendida entre longitudes de onda de 10^8 a 10^{-8} cm (cien millones a un cienmillonésimo de centímetro) del espacio electromagnético; a estas corresponden las ondas de radio, las microondas, las radiaciones láser y máser, así como las infrarrojas visibles y ultravioletas. Todas estas formas de radiación no tienen suficiente energía como para ser ionizantes, por lo cual no profundizaremos en ellas.

Radiaciones ionizantes. Los fenómenos relacionados con la radiación ionizante son ampliamente conocidos, así como sus aplicaciones científicas y tecnológicas, los efectos nocivos que pueden causar en la materia, en general, y biológicos, en particular.

La radiación ionizante se define como toda radiación electromagnética o corpuscular capaz de producir iones, directa o indirectamente, debido a su interacción con la materia (STPS, 2012), es decir, que por su energía, longitud de onda y frecuencia, pueden desligar a un electrón de su átomo, lo cual produce un proceso llamado ionización, consistente en la formación de un par de iones: el negativo —electrón libre— y el positivo —el átomo sin uno de sus electrones—.

La importancia de la radiación ionizante, en relación a la salud de los trabajadores a ella expuestos, radica en el proceso de ionización, pues su blanco principal es el núcleo de la célula, específicamente, el ADN; su efecto nocivo se genera debido a la absorción de la energía por parte del medio donde se encuentran las moléculas, lo cual provoca la aparición de radicales libres y otros agentes oxidantes. De ahí que el efecto biológico de las radiaciones ionizantes sea consecuencia de la ionización de los átomos que conforman las biomoléculas, pues se producen cambios químicos que alteran sus funciones, mismos que abordaremos más adelante.

Las formas más frecuentes de decaimiento radiactivo son:

- **Radiación α (alfa).** Un núcleo inestable emite un núcleo de helio —formado por dos protones y dos neutrones—; el núcleo original se transforma en otro. La mayoría de los núcleos pesados presenta un número másico superior a 200 son emisores de partículas.

El espectro de radiación es discreto y, al tratarse de partículas cargadas positivamente, es una radiación directa y altamente ionizante; su poder de penetración es muy pequeño, una hoja de papel o la piel pueden detenerla, por lo que el riesgo de radiación es bajo, no obstante, si un emisor es incorporado al organismo (ingestión, inhalación o heridas), la contaminación puede producir daños graves.

- **Radiación β (beta).** Existen dos tipos de radiación beta: si un núcleo inestable emite un electrón se llama *beta menos* (β^-) o negativa; y si emite un *positrón* se llama *beta más* (β^+) o positiva, el núcleo original se transforma en otro. Esta radiación está formada por

electrones que provienen del núcleo, una de sus características importantes consiste en que las partículas emitidas poseen energía distribuida de manera continua desde cero a un límite determinado superior cuyo valor depende de la naturaleza del emisor. La radiación beta negativa es directamente ionizante, si bien su poder de ionización es menor, su capacidad de penetración es mayor, por lo que para ser detenida requiere de superficies con mayor espesor; por ejemplo, para los blindajes se recomienda un número atómico bajo, como el plástico o la madera, pues si se utilizan materiales con números altos, el poder de penetración aumenta.

- **Radiación γ (gamma).** Este tipo de radiación está constituida por fotones usualmente de muy alta energía emitidos por núcleos inestables u otros procesos. El núcleo no cambia su identidad, únicamente pierde energía, es decir, que al pasar de un estado excitado a uno fundamental o a otro de energía baja se emite una onda electromagnética por un núcleo radiactivo. La radiación gamma es indirectamente proporcional, ya que, al tratarse de ondas electromagnéticas, carece de carga eléctrica y en su interacción con la materia se producen fenómenos de ionización y excitación. Debido a su pequeña longitud de onda, puede penetrar a través de espesores considerables de materia. El poder de penetración será mayor cuando la longitud de onda sea menor. Este tipo de decaimiento radiactivo es el más utilizado en medicina nuclear, principalmente en la gammagrafía, prueba diagnóstica basada en la imagen que producen las radiaciones generadas tras la inyección o inhalación de sustancias marcadas por un isótopo radiactivo que emite radiación gamma, la cual es captada por la gammacámara que forma así una imagen. El radioisótopo más utilizado en diversas pruebas de medicina nuclear es el Tecnecio-99 metaestable (^{99m}Tc).

- **Radiación neutrónica o neutrones.** Por lo general, los neutrones no son emitidos como resultado directo de la desintegración radiactiva natural, sino que se producen durante reacciones nucleares. Los reactores nucleares son generadores de neutrones en gran escala, los produce mediante el desdoblamiento o fisión de los núcleos del uranio que constituye el combustible nuclear; de hecho, la producción de neutrones es esencial para mantener la fisión nuclear en un reactor. Por su parte, las fuentes especiales de neutrones, denominadas fuentes (α , n), y los aceleradores de partículas también pueden generar neutrones; estos últimos los producen mediante la aceleración de partículas cargadas, como protones o electrones, hasta que alcanzan una alta energía para bombardear con ellas los núcleos estables de un blanco, reacción nuclear cuyo resultado es la emisión de neutrones entre otros tipos de partículas.
- **Rayos X.** La radiación X es una forma de radiación electromagnética correspondiente a una región del espectro por encima de la radiación ultravioleta. Así como la radiación gamma procede del núcleo atómico, los rayos X son un fenómeno de la corteza con energía superior, por lo que pueden atravesar espesores opacos a la luz y proporcionar imágenes de estructuras internas. Estos rayos se producen cuando un haz de electrones, tras haber sido acelerado por un potencial electrónico de centenas de miles de voltios, choca contra una placa de materia de número atómico elevado, es decir, la emisión de electrones se vuelve a obtener por efecto termoeléctrico: al calentar un filamento bajo la acción de un campo eléctrico pequeño, algunos de sus electrones escapan, estos son acelerados mediante una diferencia de potencia elevada y son atraídos por el ánodo o polo positivo, contra el cual chocan con una energía proporcional a la potencia generada. Para obtener mayor aceleración se provoca vacío en un tubo, de modo que cuando los

electrones son frenados violentamente por el ánodo, su energía cinética se convierte en energía electromagnética con la emisión de fotones de rayos X.

El descubrimiento de la radiactividad y de los elementos radiactivos marcó el inicio de una serie de hallazgos relevantes que transformaron completamente la idea que se tenía sobre las estructuras de la materia; asimismo, fue el origen de un desarrollo científico extraordinario en los campos de la física, la química y, en particular, en el conocimiento del átomo.

Es evidente que los avances tecnológicos y científicos han marcado una nueva forma de vivir en sociedad y la salud humana no ha sido ajena a estos cambios; en este ámbito, las técnicas de medición y control que emplean materiales radioactivos han permitido prolongar la vida e, incluso, preservarla, por lo cual su importancia ha ido en aumento y ha generado sus propias especializaciones: la radioterapia y la medicina nuclear.

La medicina nuclear es una especialidad médica, que si bien posee una vertiente terapéutica, se dedica principalmente al diagnóstico mediante imágenes de tipo funcional-molecular para cuyos fines emplea, a diferencia de la radioterapia que usa fuentes cerradas, diversos tipos de radioisótopos en forma de fuentes abiertas; sin embargo, la utilización de unidosos es ya una práctica común.

Tras el descubrimiento de los rayos X y la radiactividad, el desarrollo de la medicina nuclear ha sido vertiginoso; su evolución, sobre todo después de la década de 1950, ha estado marcada por el avance científico y tecnológico de los países desarrollados. La cronología que se presenta a continuación detalla los aspectos más relevantes en la historia de la medicina nuclear (Vizuet et al, 2009).

En 1913, Frederick Soddy desarrolló el concepto de isotopía al demostrar que los elementos radioactivos, a pesar de poseer propiedades químicas idénticas, podían tener más de un peso atómico, lo cual derivó en el concepto de isótopo.

Diez años después, en 1923, George de Hevesy fue el primero en utilizar trazadores en la exploración biológica; sus trabajos sobre los isótopos como trazadores en el estudio de las propiedades químicas de las sustancias lo hicieron receptor del premio Nobel.

Para 1931, Ernest Lawrence fue conocido por la construcción, utilización y mejora del primer ciclotrón, así como por su posterior trabajo en separación de isótopos de uranio, con lo cual dio un paso vertiginoso en la era nuclear.

Todavía en esa misma década (1938 y 1939), se realizaron los primeros estudios sobre la fisiología de la glándula tiroides con yodo ^{131}I y tuvieron lugar las primeras aplicaciones terapéuticas.

Casi un decenio más tarde, en 1946, se construyó el primer reactor productor de radionucleidos de manera artificial, con lo cual se inicia la inyección de elementos radiactivos artificiales (radioisótopos) a fin de analizar sus efectos y estudiar la distribución topográfica en el hombre. Así, por ejemplo, mediante la observación de la fijación del yodo en la tiroides se puede medir la radiactividad de la glándula para evaluar su actividad funcional desde un punto de vista morfológico.

Cinco años después (1951), se creó el primer escáner con cristal de centelleo de yoduro sódico, con el fin de realizar las primeras gammagrafías que proporcionarían imágenes de gran calidad susceptibles de ser analizadas para evaluar la función de las diferentes partes de un órgano determinado. Para 1952, la designación de medicina atómica, dada a este campo, fue sustituida por la de medicina nuclear.

Para 1956, Berson y Yalow perfeccionaron el desarrollo del Radio-Inmuno Análisis como técnica diagnóstica en medicina nuclear.

A principios de la década siguiente, en 1962 aparecieron los primeros generadores de Tecnecio-99 (^{99}mTc), con cualidades idóneas como trazadores y posibilidades de unión con

diversos fármacos. Un año después, Hal Anger revoluciona el área nuclear con la construcción de la cámara de centelleo para detección de la radiación.

De 1970 a 1983, se generaron las primeras aplicaciones de la técnica de tomografía SPECT cerebral y se desarrolló la técnica del PET (Tomografía por Emisión de Positrones). A partir de la década de 1970, la gammagrafía se convirtió en un medio esencial de exploración funcional de numerosos órganos y tejidos.

La invención de la cámara de positrones, la tomografía y el diagnóstico funcional por imagen posibilitaron las importantes contribuciones de la medicina nuclear a la imagenología médica. Estos avances, en conjunto con los radioisótopos, hoy permiten descubrir y diagnosticar muchos problemas de salud mediante el uso de cantidades mínimas de sustancias radiactivas, por ejemplo, la administración, inyectada o por vía oral, de una pequeña cantidad de Tecnecio 99m, enlazado a un producto químico y afín al órgano a analizar, hace posible que un detector de centelleo registre la distribución de la radiactividad absorbida por el órgano en estudio.

En México, el uso de los isótopos radiactivos inició en 1955, en el Hospital General de La Raza del IMSS; su empleo se fortaleció cuando fue inaugurado como Centro Médico Nacional en 1963 con la creación del denominado servicio de radioisótopos (Touya, 1987). En 1966, se adquirió un gammagráfo lineal con información a color, con el cual logró reducirse el tiempo total del estudio del paciente. Dos años después, se introdujo la cámara de Anger para la realización de estudios dinámicos, es decir, a fin de obtener información morfológica de un órgano o de un sistema, e información cuantitativa de su función.

2.2 Magnitudes y unidades usadas en medicina nuclear

La caracterización cuantitativa y precisa de las radiaciones ionizantes y sus posibles efectos exige disponer de un conjunto de magnitudes con sus correspondientes unidades. Desde su creación en 1925, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU por sus siglas en inglés) se ocupa de la definición formal de las magnitudes y unidades radiológicas, así como de desarrollar recomendaciones aceptables a nivel internacional acerca del uso de dichas magnitudes y los métodos adecuados de medición.

Así, de acuerdo a la ICRU, las magnitudes en el campo de la medicina nuclear se pueden clasificar en tres categorías:

- a) **Magnitudes dosimétricas.** Miden la cantidad de energía convertida y, finalmente, depositada por la radiación a su paso por la materia. Se conciben como medidas físicas que se correlacionan con los efectos reales o potenciales de la radiación. La magnitud *Dosis* es muy importante en el campo de la Radiobiología, pues brinda la medida de la cantidad de energía que una persona ha recibido y con la cual ha interactuado. Dentro de estas magnitudes se encuentran: la dosis absorbida, dosis equivalente y la dosis efectiva, las cuales se explican a continuación:

- **Dosis absorbida, D.** Refleja la cantidad de energía absorbida durante una exposición a radiaciones ionizantes por unidad de masa o volumen de sustancia irradiada. Esta depende, únicamente, de la cantidad de energía absorbida por la materia en cuestión, no del tipo de radiación ni de la naturaleza de la misma, por lo que se halla definida para todo tipo de radiación y medio absorbente. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el Gray (Gy); con anterioridad se empleaba la unidad rad. Conversión: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

- **Dosis equivalente, H.** Se define a partir de la dosis absorbida, pero considera algunos factores que intervienen en el efecto biológico derivado de las radiaciones, generado, principalmente, por la calidad de la radiación (factores de ponderación, W_r). Se ha demostrado que los efectos de los diferentes tipos de radiaciones ionizantes sobre la materia viva no son iguales, dependen de la naturaleza del tejido irradiado, del tipo y calidad de radiación absorbida, así como de la potencia y distribución de la dosis. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés), en sus nuevas recomendaciones vigentes —establecidas en su publicación número 103 de 2007—, emplea con relación a esta magnitud la designación *dosis equivalente en el órgano* (H_t); y para referirse al factor de calidad Q , utiliza el indicador coeficiente de radiación (W_r), cuyo sentido es similar al anterior, aunque sus valores difieren en algunos aspectos.
- **Dosis efectiva, E.** Esta magnitud permite realizar una mejor interpretación del detrimento a la salud —concepto empleado por la ICRP para referir la probabilidad de ocurrencia y gravedad de cáncer causado por la exposición a las radiaciones ionizantes—; posee una implicación mayor, puesto que evalúa, además del riesgo de muerte por cáncer, el riesgo de sufrir cáncer no mortal al considerar la radiosensibilidad de los diferentes órganos y tejidos. Matemáticamente, es el valor medio ponderado de la dosis equivalente H_t en los tejidos y órganos del cuerpo humano; su unidad es el Siervert (Sv), con la conversión de $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

b) Magnitudes para la medida de radiactividad. Se relacionan con la medida de la radiación producida por sustancias radiactivas. La *actividad* es su principal magnitud, conocida como el número de desintegraciones por segundo de una muestra radiactiva y se define formalmente (ICRU, 1998b) como el cociente entre el número de transformaciones nucleares espontáneas (desintegraciones) ocurridas en un intervalo de tiempo. En el sistema internacional (SI) es el s^{-1} (desintegraciones/s) que recibe el nombre de bequerelio (Bq). Una unidad más antigua es el curio (Ci); la relación entre ambas es: $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

c) Magnitudes específicas para protección radiológica. Estas magnitudes consideran los posibles efectos biológicos y el riesgo potencial asociado a la exposición a radiaciones ionizantes. En este caso distinguiremos a la magnitud exposición (X), definida, solamente, para rayos X o gamma en un punto específico en el aire. La unidad actual es el coulomb/Kg (C/Kg), aunque se continúa utilizando de manera muy frecuente el roentgen (R). Conversión: $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^4 \text{ C/Kg}$. Esta magnitud suele medirse con instrumentos especiales —contador Geiger, cámaras de ionización—, por ejemplo, cuando se realiza un levantamiento de niveles de radiación en un servicio de medicina nuclear o una evaluación en un puesto de trabajo como en los espacios circundantes a los equipos y los alrededores de las salas, pasillos de tránsito, salas de espera, etc. De este modo, es posible contemplar zonas sujetas a supervisión y controles especiales con fines de protección radiológica.

Factor de ponderación, W_t . Representa el detrimento relativo (proporción del riesgo) asociado a los efectos biológicos cancerígenos en el tejido irradiado, t . Para una irradiación uniforme de cuerpo entero se cumple: $W_t = 1$, donde el valor de la sumatoria de todos ellos es igual a 1. Los factores de ponderación W_t , se utilizan en los cálculos de la dosis efectiva recibida

por personas que han sufrido una irradiación corporal no uniforme; asimismo, expresan la contribución de los respectivos tejidos y órganos irradiados al daño total causado por los posibles efectos cancerígenos de las radiaciones.

Todas las magnitudes anteriores, cuando se relacionan con el factor tiempo, reciben el nombre de *tasa de magnitud específica*, a continuación se enlistan algunos ejemplos:

- *Tasa de exposición.* No es más que el cociente o relación entre el nivel de exposición dX con el intervalo de tiempo dt ; ej.: 2,5 R/min.
- *Tasa de dosis absorbida.* Es el cociente o relación entre el incremento de la dosis absorbida dD en un intervalo de tiempo dt ; ej.: 1 Gy/hora.
- *Tasa de dosis equivalente.* Es el cociente o relación entre el incremento de la dosis equivalente dH en un intervalo de tiempo dt ; ej.: 12,5 mSv/trim.
- *Tasa de dosis efectiva.* Es el cociente o relación entre el incremento de la dosis efectiva dE en un intervalo de tiempo dt ; ej.: 50 mSv/año.

Como se puede observar, las unidades utilizadas en cada caso son las mismas, más el factor tiempo expresado en segundos, minutos, horas, días o años, según el caso.

En el cuadro 1 se representa un resumen de las principales unidades radiológicas que se emplean en el servicio de medicina nuclear.

Cuadro 1. Resumen de unidades radiológicas utilizadas en medicina nuclear

Concepto	Proceso físico	S.I.*	Unidades antiguas
Actividad	Desintegración nuclear	Bq	Ci
Exposición	Ionización del aire	R	R
Dosis absorbida	Energía depositada	Gy	Rad
Dosis equivalente	Efecto Biológico	Sv	Rem

Fuente: ICRU¹, 2007.

* Sistema Internacional de Unidades

2.3 Detección y medida de la radiación en medicina nuclear

La radiación ionizante, en general, no es perceptible a través de los sentidos, es decir, no puede verse, oírse, sentirse, saborearse u olerse (Gaona, 2000). Por ello, es necesario valerse de instrumentos apropiados a fin de detectar su presencia, así como para cuantificar su magnitud, su energía y propiedades, las cuales ayudan a evaluar sus efectos. Los diversos tipos de detectores desarrollados poseen sensibilidades diferentes para cada tipo de radiación e intervalo de energía; por ello, es fundamental seleccionar el detector adecuado a la radiación que se desea medir.

Los detectores de radiación son usados ampliamente en diferentes ramas de la ciencia y basan su funcionamiento en la interacción de la radiación con la materia; en consecuencia, existen diferentes tipos de detectores que satisfacen las más diversas necesidades.

La radiación se detecta principalmente por: a) cambios químicos —como en las placas fotográficas—, propiedad que aún se utiliza en las placas de rayos X y en estudios de mamografía, entre otras; b) ionización de la materia, como en las cámaras de ionización, los detectores Geiger Müller, los detectores proporcionales y los detectores de semiconductor; y c) cambios físicos, como en los materiales termoluminiscentes que se emplean en los dosímetros personales.

En medicina nuclear, los métodos de detección de radiación más utilizados son los detectores por ionización de gases —cámaras de ionización, detectores Geiger Müller y detectores proporcionales—, pero también existen los detectores basados en centelladores y termoluminiscentes (Gaona, 2000), los cuales se describen brevemente a continuación:

Detectores de ionización de gases. En este grupo se encuentran los detectores Geiger Müller, las cámaras de ionización y los detectores proporcionales, parte fundamental de los monitores de radiación portátiles y fijos empleados en toda instalación de tipo nuclear para la protección y seguridad radiológica. La detección es posible en tanto la radiación ioniza el gas

contenido en el detector; posteriormente, la carga generada debe ser conducida por medio de un alto voltaje aplicado, lo cual produce una señal eléctrica en el circuito externo (Figura 1).

La cámara de ionización es uno de los medios más antiguos y simples de detección con una aplicación importante para cuantificar la radiación, se conforma de un recipiente, dos electrodos, gas de llenado y un electrómetro y se aprovecha su capacidad para determinar la actividad exacta presente en el lugar de trabajo. Su proceso de detección se basa en la medida de la carga eléctrica producida en una cámara al ser atravesada por la radiación que generan los iones formados en un gas de llenado, lo cual ocurre de la siguiente manera:

1. La radiación entra en la cámara y ioniza el gas de llenado; se forman pares de iones.
2. La aplicación de un voltaje a las paredes de la cámara crea un campo eléctrico que orienta a los pares de iones hacia los electrodos.
3. Al variar la tensión aplicada, la cámara puede trabajar en condiciones diferentes y pueden denominarse según sea el caso.

En medicina nuclear los detectores de dosis de exposición a la radiación (Gy/h o R/h) y el activímetro (Bq o Ci) son los más utilizados con el fin de administrar la dosis requerida a los pacientes en diagnóstico y tratamiento.

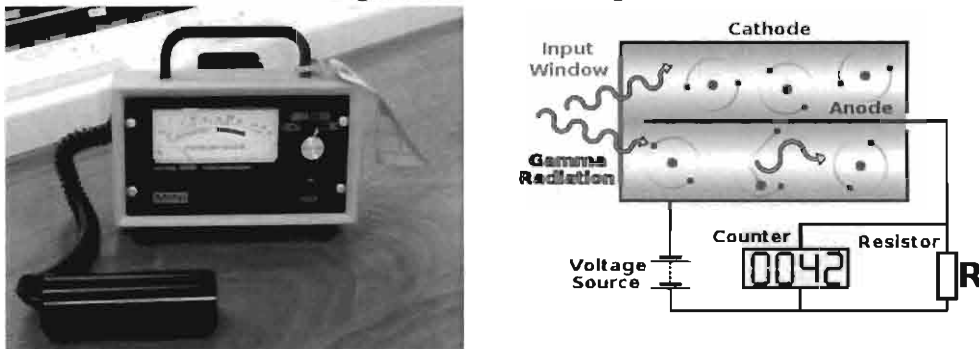
Figura 1. Cámara de ionización.



Fuente: Laboratorio de la MCST, UAM-X

Por su parte, los detectores Geiger-Müller —o sencillamente contadores Geiger— miden la radiación aproximada en los monitores portátiles; indican la presencia de radiación, mas no pueden medir su energía ni determinar el tipo de radiación, se trata, simplemente, de un contador de partículas. Estos dispositivos son los más utilizados porque son fáciles de operar, soportan trabajo pesado y se pueden incorporar a un monitor portátil; generalmente, funcionan con una corriente de alrededor de 700 a 800 volts, pero el voltaje puede variar según el diseño de cada detector (Figura 2).

Figura 2. Detector Geiger-Müller



Fuente: Detección de la radiación, en www.wikipedia.org/wiki/Contador_Geiger

Ahora bien, los detectores proporcionales se emplean, entre otras aplicaciones, en los monitores de radiación de pies y manos. A través de ellos se hace pasar, en forma continua, un gas especial llamado P-10 empleado como medio sensible. Asimismo, existen detectores proporcionales especiales con alambres múltiples, los cuales se utilizan en medicina nuclear para la obtención de imágenes.

Detectores por centelleo. Los materiales luminiscentes son capaces de emitir luz sin elevar su temperatura al ser excitados por una fuente exterior de energía. Cuando la radiación ionizante pasa a través de la sustancia ionizante e interacciona, el material absorbe la energía de la radiación, lo cual produce excitación eléctrica; cuando la sustancia luminiscente pierde

excitación, emite luz visible, misma que es directamente proporcional tanto la energía total de excitación de los electrones, como a la energía total absorbida en la sustancia luminiscente.

Los materiales luminiscentes mayormente empleados se encuentran en estado sólido o líquido, entre los más comunes se hallan el yoduro sódico con trazas de talio (NaI, Tl), usado para la detección de rayos gamma, y el sulfuro de zinc con trazas de plata en polvo, utilizado para la detección de partículas beta. La cantidad de luz generada es muy pequeña, solo de algunos fotones que el ojo humano no logra ver, por ello, la luz necesita convertirse en una señal eléctrica y esta debe amplificarse, para realizar esta última función, los detectores de centelleo requieren un dispositivo electrónico adicional, llamado tubo fotomultiplicador, el cual necesita ser alimentado por un alto voltaje para su operación. Por ejemplo, los detectores de NaI, Tl son empleados en las cámaras gamma para estudios de medicina nuclear; y el germanato de bismuto (BGO) es usado en nuevos detectores de centelleo con una capacidad de eficiencia muy alta.

Los detectores de centelleo son usados cuando se requiere una gran sensibilidad de detección, como en monitores portátiles y en la calibración de dosis de materiales radiactivos para pacientes de medicina nuclear.

Detectores de semiconductor. Un semiconductor es un material cuya capacidad para conducir la corriente eléctrica es intermedia entre los conductores (como hierro, cobre, plata) y los aislantes (materiales plásticos). Un metal conduce la corriente porque sus electrones pueden moverse libremente; un aislante no conduce porque sus electrones no poseen ninguna movilidad.

Los electrones de un semiconductor tienen una movilidad intermedia que puede variar con ciertos factores como, por ejemplo, la irradiación. Cuando un semiconductor (en estado sólido) se irradia, se liberan electrones que, sometidos a un voltaje adecuado, producen una corriente eléctrica que no aparecería en ausencia de la radiación; la corriente eléctrica generada es proporcional a la radiación incidente.

Los materiales más usados en este tipo de detectores son el germanio y el silicio; los primeros se emplean para radiación gamma, mientras que los segundos se utilizan para partículas alfa y electrones. Los detectores de semiconductor comenzaron a emplearse alrededor de 1950 para medir radiación alfa; posteriormente, se desarrolló una gran variedad de tipos como los de barrera superficial, de germanio-litio, de silicio-litio y de germanio hiperpuro, hasta 1979 empezaron a fabricarse los diodos PIN de silicio de alta pureza.

Debido a que la densidad de los semiconductores es mucho mayor a la de los gases, su eficiencia de detección es mejor que la provista por los detectores de ionización de gas. Otra ventaja que ofrecen los semiconductores consiste en que requieren una energía muy baja (de 3.6 eV en silicio) para crear un par de iones, mientras que en los gases se requieren energías promedio mayores (del orden de 30 eV).

En relación a los detectores de centelleo, los de semiconductor ofrecen las ventajas de ser más simples, poseer un tamaño pequeño y emplear un bajo requerimiento de potencia para operar, lo cual evita el uso de voltajes altos.

Debido a que la operación de estos detectores a temperaturas muy bajas logra valores de ruido muy pequeños, posibilita la obtención de altas resoluciones en energía. Recientemente se ha realizado el enfriamiento de los detectores por efecto Peltier, con lo que se reduce considerablemente el volumen del sistema de detección y se consigue un ahorro en el consumo de nitrógeno líquido.

En los últimos años, se han encontrado nuevas aplicaciones a estos tipos de detectores, por ejemplo, el área de física médica y, particularmente, el campo de la generación de imágenes han sido favorecidas con el desarrollo de la tecnología de los semiconductores y la microelectrónica.

Dosímetros personales. De acuerdo al RGSR, todo el POE perteneciente al servicio de medicina nuclear debe utilizar equipo de protección personal, que incluye el dosímetro para determinar las dosis recibidas durante las actividades de los trabajadores. Actualmente se emplean, fundamentalmente, dos tipos de dosímetros: los de película fotográfica y las cámaras de ionización de bolsillo, si bien existe un interés creciente por los dosímetros termoluminiscentes y los digitales.

- a) Dosímetro de lectura indirecta. En este tipo de dosímetros la radiación ionizante interacciona con la película, lo cual causa un cambio fotoquímico que produce su ennegrecimiento, este depende de la exposición total a la radiación y se mide mediante un densitómetro óptico, instrumento que mide la fracción de la luz transmitida. El tipo y energía de la radiación se distingue por medio de un filtro de plomo, aluminio y plástico que se interpone a la radiación. La medición contempla dosis comprendidas entre 0,1 mGy y 10 Gy de radiación gamma.
- b) Dosímetros de lectura directa. Sin necesidad de ningún equipo adicional, estos dispositivos permiten una lectura inmediata y directa desde la dosis que el dosímetro ha registrado, hasta el momento en que ha sido expuesto. Los más utilizados son los dosímetros tipo pluma, cuya denominación obedece a su parecido con una pluma estilográfica.

Básicamente, se trata de una pequeña cámara cilíndrica que posee en su interior un condensador cargado, a medida que la radiación incide en él se descarga, ioniza el gas de la cámara; la descarga queda registrada en una escala que puede leerse en cualquier momento. Los dosímetros de lectura directa no son muy precisos, pues sus lecturas pueden ser afectadas por la suciedad, la electricidad estática, la humedad y el manejo brusco del dispositivo; asimismo, los valores máximos de dosis que pueden registrar no

suelen ser muy altos, lo cual supone un inconveniente; sin embargo, poseen la ventaja de la inmediatez y facilidad de lectura.

- c) Dosímetros digitales. Usan generalmente un tubo de Geiger-Müller como detector de radiación. En estos dispositivos la salida del tubo se conecta a un círculo de estado sólido que suministra una lectura digital de la dosis o tasa de radiación gamma; una señal acústica indica al portador del dosímetro que se ha superado el umbral de alarma.

Dosímetros de termoluminiscencia, TLD. Al igual que los materiales luminiscentes, los materiales termoluminiscentes absorben la energía de la radiación en forma de excitación eléctrica, sin embargo, estos materiales liberan la energía almacenada en forma de luz solo cuando son calentados a altas temperaturas. Así, los materiales se utilizan para acumular la dosis recibida durante un intervalo prolongado de tiempo.

Cuando se mide la dosis, el material TLD es colocado en un dispositivo óptico, se calienta y la luz emitida es medida por medio de un fotomultiplicador. Debido a que la energía absorbida en el material está directamente relacionada con la dosis absorbida, la carga total recolectada en el fotocátodo estará relacionada con la dosis total. Los materiales termoluminiscentes más utilizados en dosimetría son el fluoruro de litio (LiF) y el fluoruro de calcio (CaF_2) (Torres, 2009).

2.4 Principios de protección radiológica en medicina nuclear

La protección radiológica en medicina nuclear comienza con el diseño de las instalaciones del servicio y concluye con la implementación de programas de garantía de calidad que establecen las acciones y las normativas a seguir para cumplir con los tres principios de protección radiológica.

En medicina nuclear, las radiaciones ionizantes provienen de tres fuentes principales: los radiofármacos, los pacientes y los desechos radioactivos, de los cuales es necesario proteger a trabajadores, pacientes y sus familiares, así como al público en general.

En el caso de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a las radiaciones, es importante que cumplan con los tres factores físicos de protección radiológica: tiempo, distancia, y blindaje, de los cuales se hablará más adelante; cada uno de ellos constituye una herramienta fundamental en la optimización de la protección y en la limitación de las dosis absorbidas por el trabajador.

Por lo anterior, se han establecido tres principios básicos para alcanzar el objetivo de la protección radiológica, esto es, evitar los efectos deterministas manteniendo las dosis por debajo de un límite umbral y mediante la disminución, en la mayor medida razonablemente posible, de la probabilidad de aparición de efectos estocásticos.

- a) **Justificación.** Tiene como objetivo garantizar que toda exposición está debidamente justificada. Generalmente, cada procedimiento terapéutico o de diagnóstico en medicina nuclear conlleva exposición a las radiaciones, por lo que es necesario someter dicho proceso a un análisis de riesgo- beneficio a fin de que este último prevalezca. El propósito de este principio es evitar la realización de prácticas causantes de exposiciones injustificadas que conlleven un riesgo innecesario sobre la salud de las personas involucradas.
- b) **Limitación de dosis.** La base fundamental de este principio consiste en establecer límites de exposición, los principales son los primarios de dosis para trabajadores expuestos y público en general. Estos límites no deben considerarse como una frontera entre la seguridad y el peligro, sino como indicadores evaluativos de exposición, de riesgo y de detrimento a la salud. Actualmente, el cumplimiento de estos límites

garantiza la ausencia de efectos deterministas y limita al máximo el riesgo de padecer efectos estocásticos —cáncer y alteraciones genéticas— producidos por las radiaciones ionizantes.

En México, los límites máximos permitidos de exposición se establecen en el RGSR y en la NOM-012-STPS-2012 referente a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen y manejen radiaciones ionizantes. En el caso de los trabajadores expuestos, se establece, para cuerpo total, un límite de 50mSv/año, según el sistema internacional de unidades.

- c) **Optimización.** Con este principio se trata el origen, planificación, uso y aplicación de cualquier fuente de radiaciones ionizantes con el fin de asegurar los niveles más bajos de exposición y atiende también a factores económicos y sociales. Conocido anteriormente como el *principio de ALARA*, por las siglas en inglés de *As Low As Reasonably Achievable*, es decir, ‘lo más bajo razonablemente posible’, su objetivo consiste en cubrir de modo cualitativo el trabajo con radiaciones ionizantes.

La ICRP, como ya se ha mencionado, es un organismo internacional de expertos en radiación dedicados a examinar y reportar sobre asuntos de protección radiológica. Desde su creación, esta comisión ha desarrollado un sistema de protección radiológica que se ha difundido y ha ganado aceptación; sus guías y recomendaciones conforman las bases de la legislación en muchos países.

Es importante señalar que de acuerdo con la ICRP, siempre que se acaten los límites vigentes de dosis planteados en sus recomendaciones, no será necesario establecer ningún régimen especial en reducción de horario de trabajo, aumento de la periodicidad de vacaciones, jubilación anticipada ni alimentación especial, entre otros, sobre los trabajadores expuestos secundario al factor de riesgo ocasionado por las radiaciones ionizantes; incluso, en el caso de

mujeres embarazadas, si se garantiza el cumplimiento del límite establecido —al efecto de 2 mSv sobre la piel en la región inferior del abdomen durante todo el embarazo—, no se plantea la necesidad de cambios ni condiciones especiales de trabajo.

Respecto al último punto mencionado, el Reglamento de Seguridad Radiológica en nuestro país, en su capítulo III correspondiente a los límites de equivalencia de dosis, establece los siguientes artículos:

Artículo 27.- La irradiación que reciban las mujeres ocupacionalmente expuestas con capacidad reproductiva deberá distribuirse lo más uniformemente posible en el tiempo, con objeto de proteger al embrión durante el periodo de organogénesis antes de conocerse el embarazo.

Artículo 28.- Las mujeres ocupacionalmente expuestas que se encuentren embarazadas solo podrán trabajar en condiciones donde la irradiación se distribuya lo más uniformemente posible en el tiempo y que la probabilidad de que reciban un equivalente de dosis anual mayor a 15 mSv (1.5 rem) sea muy baja.

Artículo 29.- Las mujeres ocupacionalmente expuestas que se encuentren en periodo de gestación o de lactancia no deberán trabajar en lugares donde exista riesgo de incorporación de materiales radioactivos.

Sin embargo, y de acuerdo a la NOM-012-STPS-2012, es obligación del patrón prohibir que las mujeres en estado de gestación o lactancia trabajen en lugares donde exista riesgo de exposición a fuentes de radiación ionizante.

A continuación, se presentan los límites de dosis establecidos para la exposición ocupacional y la exposición al público (Tabla I).

Tabla 1. Límite de dosis establecido para el POE y público en general.

Magnitud		Exposición ocupacional	Exposición del público
Dosis efectiva		20 mSv por año, el promedio en 5 años. No debe exceder los 50 mSv en un año.	1 mSv por año como promedio en 5 años.
Dosis equivalente	Cristalino del ojo	150 mSv en un año	15 mSv en un año
	Piel	500 mSv en un año	50 mSv en un año
	Extremidades	500 mSv en un año	50 mSv en un año

Fuente: IAEA, 1996.

Como se ha mencionado anteriormente, el ser humano ha existido siempre en un entorno donde se halla expuesto a radiaciones ionizantes, por ello, una gran proporción de la dosis efectiva anual recibida por la población resulta de la radiación natural proveniente del medio ambiente, esta dosis varía de un sitio a otro, depende de la altitud y de la abundancia de minerales radioactivos naturales en las rocas y el suelo. Adicionalmente, un 14% de la exposición anual promedio es creada por el hombre, de esta un 10% corresponde al uso de rayos X y un 4% es debida a procedimientos de medicina nuclear. Existe, además, un pequeño porcentaje aportado por otras fuentes de radiación como armas nucleares y combustibles, entre otros. (Perkins, 1996)

En medicina nuclear existen tres tipos de emisión que nos interesan en términos de protección radiológica, estas son las partículas alfa, beta y gamma, pues algunos de ellos tienen gran impacto en la dosimetría del paciente.

La exposición a la radiación puede ser interna o externa. La primera se produce cuando un radionucleído es inhalado, ingerido o entra en contacto con el torrente sanguíneo (inyección o herida); esta cesa cuando el radionucleído se elimina del cuerpo, ya sea por vías naturales (orina, excremento, lagrimas, etc.) o por tratamiento médico.

La segunda, la contaminación externa, se genera cuando el material radiactivo presente en el aire en forma de polvo, líquido o aerosol, se deposita sobre la piel o la ropa, generalmente, este tipo de material radiactivo puede eliminarse del organismo con el lavado de la zona.

En el servicio de medicina nuclear, dado que se utilizan fuentes radiactivas abiertas —o no selladas—, existe posibilidad de exposición tanto a la radiación externa, como interna.

La exposición externa puede ser por fuentes selladas o abiertas. Las fuentes selladas de radionucleídos de vida media larga son usadas en medicina nuclear solo como patrones de referencia para calibración de instrumentos, aquellas que contienen líquidos deben ser revisadas periódicamente para confirmar que no constituyen peligro de contaminación. Las fuentes de exposición externa más comunes están constituidas por la dosis de radiofármacos y los pacientes a los cuales se han administrado para realizar los estudios programados.

La exposición interna del personal es muy poco frecuente en su actividad diaria. En general, el derrame de sustancias radiactivas que puede provocar contaminación proviene de pérdidas durante la administración del radiofármaco, fluidos corporales del paciente, especialmente orina, saliva, contenido gástrico (vómito) y goteo o daño del contenedor de la fuente. La contaminación radiactiva del aire puede ocurrir cuando se abre un vial de yodo 131, sustancia muy volátil, o cuando se realizan estudios de ventilación pulmonar por inhalación de aerosoles o gas de ^{99m}Tc .

Es por ello que, desde el punto de vista de Protección Radiológica, actualmente las áreas de trabajo con alguna fuente emisora de radiaciones ionizantes se clasifican en: zona controlada y zonas supervisadas de acuerdo RGSR y a la NOM-008-NUCL-2011 referente al control de la contaminación radiactiva, las cuales se comentan a continuación.

Zona controlada. Es la zona sujeta a supervisión y controles especiales con fines de protección radiológica. En esta zona debe existir una correcta señalización y deben cumplirse todas las medidas de protección radiológica como tener barreras físicas definidas, control de las personas que laboran y transitan, vigilancia radiológica del personal y uso de elementos de protección personal, por mencionar algunas.

Zonas supervisadas que de acuerdo a la NOM-008-NUCL-2011 se clasifican:

- Con alta contaminación, que es cualquier zona donde el nivel de contaminación removible es mayor o igual a 100 veces los límites establecidos en el Apéndice A de esta norma.
- Contaminada, que es la zona donde el nivel de contaminación removible rebasa, o que debido a la naturaleza de los trabajos a realizar, se puedan rebasar los límites establecidos de la presente norma sin exceder 100 veces el valor de los mismos.
- Con contaminación suspendida en aire, que es aquella en donde se exceden los valores de la concentración derivada en aire (CDA) establecidos en la NOM-005-NUCL-1994 o, en caso de estar normalmente ocupada, la concentración de material radiactivo promedio semanal excede el 25% de la CDA.
- Radiación, que es aquella accesible únicamente al personal ocupacionalmente expuesto, en la que el equivalente de dosis a cuerpo entero, pudiera ser superior a 0.05 mSv en una hora o a 1 mSv en cualquier periodo consecutivo de cinco días.
- De alta radiación, es aquella accesible únicamente al personal ocupacionalmente expuesto, en la que el equivalente de dosis a cuerpo entero en una hora, pudiera ser superior a 1 mSv.

Las zonas libres corresponden a todas las áreas donde no existen fuentes emisoras de radiaciones, por ejemplo, las salas de espera, los pasillos, oficinas administrativas en un servicio de imagenología, entre otros espacios que no requieren ningún tipo de medidas de protección radiológica.

Existen limitaciones prácticas establecidas por las comisiones nacionales e internacionales para proteger a los trabajadores ocupacionalmente expuestos. La racionalización de estos límites se basa en que aun los usos pacíficos de la energía atómica requieren protección radiológica y en la noción de que es imposible blindar por completo a los trabajadores. Por esta razón, el personal de medicina nuclear debe estar constantemente alerta sobre los métodos prácticos de radioprotección, ya que, su uso adecuado posibilita que el nivel de radiación a la cual el trabajador está expuesto sea mantenido en dosis mínima y dentro de los límites recomendados, los cuales se mencionan a continuación:

Blindaje. Este método disminuye el campo de radiación entre la fuente y la persona o el punto de interés específico, con lo cual se logra una disminución de las tasas de dosis de exposición tanto de los trabajadores expuestos, como del resto de la población.

Existe la metodología con procedimientos matemáticos y cálculos bien establecidos para conseguir un adecuado blindaje según las características de la fuente generadora, es decir, cada caso es particular, por lo tanto, el cálculo de blindaje también es específico. Los materiales de absorción más eficaces y utilizados son el plomo y el concreto.

En muchas ocasiones, como en los equipos de rayos x convencionales, basta tan solo con el blindaje que puede proporcionar una pared de ladrillo o concreto de un espesor normal; no obstante, es importante mencionar que esta medida de protección depende del nivel energético de la fuente que se vaya a blindar y de las características de la instalación o área de trabajo.

Los equipos de protección personal se consideran parte del blindaje, cada vez que exista exposición a un campo de radiaciones deben ser usados tanto por el personal expuesto, como por los acompañantes e, incluso, por los pacientes si es necesario. Existen distintas alternativas o medios que van desde el uso de ropa exclusiva de trabajo, guantes plomados, lentes de seguridad y protección respiratoria, entre otros, hasta el empleo de delantales plomados y collarines que son los más conocidos y utilizados dentro de la radiología médica y dental (STPS, 2008). Estos últimos pueden tener diferentes espesores según el campo de radiación; en el caso de la radiología convencional el espesor es de 0.25 mm de plomo; es necesario considerar que, en muchas ocasiones, el uso del delantal plomado no significa que no exista exposición a las radiaciones, por ello, se debe tener presente el cumplimiento de las medidas de protección operacional. El equipo de protección personal debe cuidarse y protegerse de manera adecuada para mantener su efectividad y prolongar su vida útil.

Tiempo. Es también un método práctico de radioprotección, pues cuanto más tiempo se exponga un individuo a un campo de radiación, mayor será la exposición total, es decir, el tiempo es directamente proporcional a la exposición a la radiación, por lo que resulta esencial emplear en cada práctica el menor lapso posible de radiación sin afectar la calidad del estudio.

El tiempo debe ser utilizado como control de la exposición a la radiación. En las aplicaciones diagnósticas de medicina nuclear, el tiempo no es un factor tan importante como cuando se trata de aplicaciones terapéuticas. En este sentido, existen tres grupos de personas no expuestas y ocupacionalmente expuestas que merecen especial consideración: personal de enfermería, visitas y pacientes adyacentes, para quienes la dosis no puede exceder de 1 mSv por año o de 0.02 mSv en una hora (RGSR, 1988).

Distancia. Constituye uno de los métodos más utilizados, pues no solamente es un procedimiento efectivo de protección, sino que también es el más económico. Cuando un

individuo se aleja de la fuente radioactiva, naturalmente esperará recibir menos radiación, podría pensarse que si la distancia se duplica, recibirá la mitad de la radiación; sin embargo, en realidad, la persona recibirá un cuarto de radiación de acuerdo con la *ley del cuadrado inverso de la distancia*, la cual establece que la cantidad de radiación recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente. Así, al duplicar la distancia, la dosis es $\frac{1}{4}$ de la original, si la distancia se reduce a la mitad, la dosis será cuatro veces mayor a la original.

La ley arriba mencionada se aplica con mayor exactitud para fuentes puntuales emisoras gamma, no para fuentes mayores ni fuentes múltiples; así como explica la sugerencia del uso de pinzas largas o controles remotos para mantenerse tan alejado como sea posible de la fuente emisora.

Hay dos aspectos que se deben de tomar en consideración para evaluar los riesgos de la exposición a la radiación en este campo de la medicina: la radiación externa y la contaminación debida a los radioisótopos excretados. La radiación externa depende, simplemente, del radionucleído que se utiliza, del tipo de sus emisiones y de su periodo de semidesintegración. Sin embargo, las excreciones pueden contaminar el entorno del paciente y pueden ser ingeridas por otras personas. En caso de que el paciente fallezca tras ser dado de alta, se han de tener en cuenta los aspectos de seguridad radiológica en la inhumación o cremación del cadáver.

El paciente tratado con radioisótopos es una fuente de radiación, si el utilizado es un emisor beta de baja energía, esta radiación incluso podría no ser detectable; por el contrario, si se emplea un emisor de rayos gamma de energía media, los niveles de radiación en las inmediaciones del paciente pueden ser considerables. A pesar de que la exposición del público a la radiación de fotones no es significativa en cuanto al riesgo de cáncer, debe mantenerse tan baja como sea razonablemente posible, especialmente para niños y mujeres embarazadas.

La excreción de los radiofármacos utilizados puede tener diversos destinos:

- Retención total y permanente en el cuerpo. Esto normalmente se limita a las partículas que quedan atrapadas en un determinado órgano o sistema.
- Captación y retención parcial de las partículas con la posible eliminación de los radionucleídos libres.
- Captación y retención parcial de los compuestos iónicos con excreción del resto.

Las vías de eliminación son orina, excremento, saliva, sudor, fluido lacrimal y leche materna, cada una plantea problemas de seguridad diferentes y todos pueden conducir a la contaminación. En particular, la tasa de eliminación de los radioisótopos del cuerpo del paciente es diferente, pues depende tanto de los radiofármacos empleados, como de cada organismo en particular. La principal vía de eliminación es, generalmente, la renal, lo que da lugar a altas concentraciones en orina y en el alcantarillado sanitario.

La estimación de la exposición a la radiación externa se basa no sólo en la eliminación de los radiofármacos del cuerpo del paciente, sino también en la distancia y el tiempo de exposición. Es posible elaborar un perfil del tiempo que el cónyuge u otros familiares permanecen a una determinada distancia del paciente, mismo que posteriormente se puede utilizar para estimar la dosis acumulada. Cuando las recomendaciones de protección radiológica son aplicadas correctamente, con estos métodos el riesgo se puede sobreestimar considerablemente. La exposición ocupacional del personal ocasionada por la permanencia de los pacientes en el hospital después de la terapia o durante la administración del radiofármaco, en general, es muy baja, incluso insignificante.

La principal ventaja de que el paciente permanezca en las instalaciones hospitalarias es el control de su entorno; la decisión de darlo de alta se basa en el posible riesgo de irradiación para otras personas, el cual es mínimo.

Por otro lado, dado que el riesgo biológico está directamente relacionado con la dosis de radiación a los tejidos, la absorción de material radioactivo debe estar restringida; de ahí las recomendaciones de protección radiológica en medicina nuclear que se presentan a continuación:

a) Control de la exposición interna. La mayoría de los radioisótopos que se utilizan en medicina nuclear son considerados leve o moderadamente tóxicos con respecto a contaminación interna; sin embargo, una excepción significativa la constituye el ^{131}I (yodo-131), considerado altamente tóxico debido a su afinidad con la glándula tiroides.

La exposición interna por ingestión, inhalación o absorción dérmica puede ser satisfactoriamente controlada a través de prácticas simples y sistemáticas que incluyen:

- Vestir bata o delantal que proteja la ropa en toda área donde se manejen fuentes radioactivas abiertas; las prendas protectoras deben ser retiradas antes de abandonar el área apropiada para su uso.
- Utilizar guantes siempre que se manipule material radioactivo.
- No comer, beber, fumar ni aplicar cosméticos en áreas en las cuales se utilice o almacene material radioactivo.
- No almacenar alimentos, bebidas o artículos personales en áreas en las cuales se utilice o almacene material radioactivo.
- No utilizar la boca con ningún tipo de instrumento, como pipetas para fraccionar o medir material radioactivo.

- Mantener el área de trabajo libre de contaminación. Realizar semanalmente verificaciones para identificar áreas que requieran descontaminación.

b) Control de la exposición externa. La exposición externa puede ser controlada por los métodos de minimización del tiempo, maximización de la distancia y empleo de blindajes.

El factor tiempo puede ser optimizado mediante la realización de nuevos procedimientos con material no radioactivo a fin de que se adquiera experiencia para poder llevarlos a cabo de manera eficaz. No obstante, cabe apuntar que el intentar realizar los procedimientos de forma demasiado rápida puede resultar en derramamientos u otros accidentes que aumentarán el tiempo de exposición.

En la práctica se pueden lograr distancias de trabajo seguras de diversas maneras: manejar los viales con pinzas, almacenar el material radioactivo de desecho en áreas alejadas del tránsito del personal, mantener la mayor distancia posible de los pacientes inyectados durante los procedimientos.

En cuanto a los blindajes, se deben usar ladrillos de plomo, vidrio plomado, protectores de jeringa, contenedores para el almacenaje de material de desecho, maletines plomados para el transporte de dosis, por mencionar solo algunos.

Aunque en la rutina de trabajo en medicina nuclear se utilizan distintos tipos de radioisótopos, el problema de la exposición externa es generado en un 90% por el ^{99m}Tc y la principal fuente de exposición es la radiación proveniente de los pacientes inyectados para los procedimientos diagnósticos. La relación de exposición típica es 10 a 15% por preparación de la dosis, 10% por la administración de la inyección y de 75 a 80% por el estudio. Esto implica que una fracción sustancial de la dosis anual de cuerpo entero del trabajador del servicio se debe a la presencia del paciente durante la realización del estudio. En la práctica, este componente puede ser reducido al mantener una mayor distancia con el paciente o al interponer un blindaje entre

este y el trabajador; también el uso de blindaje para la jeringa reduce considerablemente la dosis en manos y dedos durante el procedimiento de inyección.

2.5 Biología de la radiación

La biología de la radiación o radiobiología es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en los seres vivos tras la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes (Alegre, 2001).

El uso de las radiaciones con fines diagnósticos y terapéuticos obedece a su capacidad para penetrar el tejido y transformar sus células. Sin embargo, esta propiedad, patente desde el descubrimiento de los rayos X, también demostró la acción dañina que podía provocar en los seres humanos ante la aparición de determinados efectos no deseados en quienes trabajaban con radiación ionizantes.

Por lo anterior, a continuación se exponen las características básicas de la célula con el fin de comprender el efecto nocivo que ejerce la radiación ionizante sobre ella.

La célula es la unidad morfológica y funcional de los seres vivos; está constituida por: membrana plasmática, citoplasma, orgánulos y un núcleo que contiene el material genético.

El daño a la salud que causan las radiaciones ionizantes depende de la dosis absorbida, la magnitud, la distribución y el tiempo de exposición que puede ser agudo, es decir, durante breves segundos o minutos, como en el caso del empleo de radioisótopos en medicina nuclear; o bien, crónico, continuo o intermitente a lo largo de meses e, incluso, años, lo cual sucede en la exposición ocupacional.

La interacción de la radiación en la célula presenta las siguientes características: sucede al azar (carácter probabilístico); la cesión de la energía a la célula ocurre en un tiempo muy breve (10^{-17} seg); no existe ningún componente celular con el cual la radiación presente afinidad; la

lesión que se produce es indeterminada, existe un periodo de latencia entre la irradiación y la aparición de los daños que varía de acuerdo con la dosis recibida.

Desde el punto de vista biológico, los efectos pueden ser somáticos, es decir, aparecen en el sujeto que recibe la radiación, o genéticos, surgen en su descendencia en virtud de la lesión que recibieron las células germinales de los progenitores. Cabe destacar que la probabilidad de aparición de efectos aumenta al incrementar la dosis de radiación.

Los efectos biológicos por radiaciones ionizantes se han clasificado de varias maneras en consideración a distintas variables; no obstante, en la actualidad, la clasificación recomendada por las organizaciones internacionales como la UNSCEAR, la CIPR, el OIEA, OMS y la OPS, se fundamenta en los efectos deterministas y estocásticos:

1. **Efectos deterministas:** su aparición está sujeta a un umbral de dosis, es decir, existe una relación directa dosis-efecto, tanto en el tipo de alteraciones como en su gravedad, como por ejemplo radiodermitis, radiocataratas, infertilidad temporal y permanente, alteraciones hematológicas radioinducidas, entre otras.
2. **Efectos estocásticos:** son aleatorios, dependen de probabilidades, por lo que su aparición no supone la existencia de un umbral de dosis; sin embargo, el aumento de la dosis recibida eleva la probabilidad del riesgo de incidencia de estos efectos y su severidad es independiente a la dosis. Dentro de estos efectos se encuentran la carcinogénesis (cánceres radioinducidos) y los efectos genéticos.

La reacción del organismo a las radiaciones ionizantes depende de diferentes factores externos e internos. Los factores externos son ajenos al organismo, se producen, principalmente, por las características de la radiación y entre los principales se encuentran los que se presentan a continuación:

- a) Tipo de radiación ionizante. Se debe tomar en cuenta la transferencia lineal de energía (TLE), esto es, el tipo de radiación ionizante que interactúa con la materia determina la cantidad de energía que es capaz de ceder al medio. Asimismo, es necesario atender al poder de penetración, es decir, cuando las radiaciones con alta TLE (radiaciones alfa y beta) interactúan con el medio, pero con un recorrido breve (de 0.5 a 3 cm.), por lo tanto, con poco poder de penetración.

Por otro lado, los neutrones también poseen un TLE elevado (alto nivel de ionización) y un gran poder de penetración. Las radiaciones con baja TLE como los rayos X y gamma, tienen poco nivel de ionización, pero pueden alcanzar grandes distancias, por lo que su poder de penetración también es elevado.

- b) Dosis y tasa de dosis. Existe una relación directa entre la magnitud (cantidad) de la energía depositada en la materia por la radiación ionizante que interactúa con el organismo, y el tipo de lesión, su gravedad y el tiempo de aparición de la sintomatología. Es innegable que los mecanismos adaptativos y compensatorios del cuerpo humano son efectivos a exposiciones de bajas dosis; asimismo, se debe considerar la forma de administración de la dosis o el medio por el cual fue recibida la irradiación. El fraccionamiento hace que el efecto sumario total sea menor, ya que los mecanismos compensatorios se manifiestan. Una irradiación única, según su magnitud, es más dañina.
- c) Área y localización de la irradiación. Mientras más extensa sea el área irradiada, mayor será la dosis absorbida y, por tanto, el daño será directamente proporcional. Las manifestaciones clínicas varían según el tamaño y la localización del área irradiada, las alteraciones son específicas como resultado de la diferencia de radiosensibilidad de los distintos tejidos del organismo.

- d) La magnitud y la distribución de la dosis son factores fundamentales que influyen en el daño radiobiológico.

Ahora bien, los factores internos dependen del sujeto, en este sentido, se consideran los siguientes:

- a) Edad. Las células de los organismos jóvenes (embrión, niños) son radiosensibles debido al promedio elevado de poblaciones celulares en división (mitosis). Por su parte, las personas de la tercera edad también son radiosensibles, más en este caso, por la disminución de respuesta en el sistema inmunológico (inmunodepresión) y el deterioro de los procesos compensatorios del organismo.
- b) Concentración de oxígeno. A mayor concentración de oxígeno en los tejidos, mayores serán los efectos nocivos de las radiaciones (efecto oxígeno), esto se debe al aumento de la formación de radicales libres, tóxicos para las células.
- c) Metabolismo. El aumento de velocidad en su funcionamiento incrementa los efectos nocivos de las radiaciones, en tanto incrementa la formación de radicales libres, elementos dañinos para el funcionamiento celular normal (efecto oxígeno).
- d) Radiosensibilidad. Como es sabido, no todos los tejidos poseen la misma sensibilidad a las radiaciones ionizantes, si bien la causa no está esclarecida, se cree que esto se debe a las diferencias en el metabolismo que pueden existir entre distintas especies. Este factor incluye la radiosensibilidad individual, para la cual es necesario tomar en cuenta el metabolismo del sujeto irradiado, así como otros aspectos importantes como patologías o enfermedades generales, actividad cardiorrespiratoria, estado nutricional y nivel de estrés.

Los efectos relevantes en medicina nuclear no son deterministas, pues estos ocurren cuando ha habido una pérdida de función tisular, usualmente como resultado de muerte celular o

pérdida del potencial mitótico. El número de células afectadas aumenta rápidamente con la dosis y el daño de la función tisular se hace evidente por encima de una dosis umbral, la cual es específica para cada tejido. Los procedimientos diagnósticos de medicina nuclear están por debajo de la dosis umbral para efectos deterministas, mientras que para la terapia con radionucleídos, la dosis umbral es explotada y se excede solamente para el tejido blanco.

La dosis umbral está influenciada por la tasa de dosis (las tasas bajas de dosis brindan tiempo a la repoblación celular y a los mecanismos de reparación para actuar). En la terapia con radionucleídos, la entrega de dosis es prolongada por la biocinética del radiofármaco y el decaimiento del isótopo, lo cual reduce la probabilidad y severidad del daño tisular concomitante. En radioterapia se logra el mismo efecto fraccionando la exposición para minimizar los efectos indeseados en tejidos sanos.

Para la mayoría de los tejidos las dosis umbrales van desde unos pocos grays administrados como una única dosis, hasta 0.5 Gy/año para exposiciones fraccionadas. Los tejidos más sensibles para efectos deterministas son la médula ósea, los testículos y el cristalino. Aunque la piel no es particularmente radiosensible, la medicina nuclear manifiesta interés en ella debido a la posibilidad de alta exposición accidental por contaminación localizada. El umbral para ulceración transitoria se estima en 1 Gy a una profundidad promedio de 1 cm.

Al contrario de los efectos deterministas, en medicina nuclear cobran relevancia los efectos estocásticos debido a que suceden cuando la célula sufre modificaciones por daño a su ADN, aunque permanece viable, pues el daño puede, eventualmente, manifestarse a través de la proliferación celular. Los dos efectos estocásticos de preocupación son el cáncer, tras un periodo de latencia de varios años (2-10 para leucemia y 10-40 para tumores sólidos), y las enfermedades hereditarias severas. Cualquier reducción en el promedio de vida por exposición a bajas dosis

puede atribuirse a desarrollo de cáncer. El riesgo de cáncer es la principal preocupación de los sistemas de protección radiológica tanto para el trabajador, como para los pacientes.

La absorción de energía por radiación ionizante produce daño a nivel molecular por acción directa o indirecta. Por acción directa el daño ocurre como resultado de la ionización de los átomos de moléculas clave para el sistema biológico, lo cual causa desactivación o alteración funcional de la molécula. La acción indirecta involucra la producción de radicales libres reactivos, cuyo daño tóxico en moléculas clave resultará en un efecto biológico.

a) Acción directa. La ionización directa en átomos de moléculas ocurre como resultado de la absorción de energía por efecto fotoeléctrico e interacción Compton. La ionización sucede con todos los tipos de radiación, pero el daño predominante es provocado por aquellas radiaciones con alta TLE. La absorción de energía suficiente para remover un electrón puede generar rupturas de uniones, lo cual también es un efecto de la excitación de átomos en moléculas clave; en este caso, la energía puede ser transferida a un sitio de unión más débil de la molécula, lo que deriva en la ruptura. Asimismo, en los cambios tautoméricos la energía de excitación puede crear predominancia de una forma molecular.

b) Acción indirecta. Involucra la transferencia de energía a un átomo con el subsiguiente decaimiento a un tipo de radical libre. Un radical libre es un átomo eléctricamente neutro con un electrón no ocupado en la posición orbital; es electrofílico y altamente reactivo. Debido a que la molécula predominante en los sistemas biológicos es el agua, esta es, usualmente, intermediaria entre la formación de radicales y su propagación. La molécula de agua absorbe energía y se disocia en dos radicales con electrones no compartidos en la capa de valencia; los radicales libres se combinan para neutralizarse de forma eléctrica y orbital. Sin embargo, cuando se generan demasiados radicales, como en flujos elevados de radiación, la neutralidad orbital puede ser lograda mediante la dimerización de los radicales de hidrógeno y la formación de peróxido de

hidrógeno tóxico (H_2O_2). El radical también puede ser transferido a una molécula orgánica en la célula.

La vida media de los radicales libres simples ($\text{H}^\bullet$ ó $\text{OH}^\bullet$) es muy corta, y aunque, generalmente, son altamente reactivos, no subsisten lo suficiente para migrar del sitio de formación al núcleo celular. Sin embargo, el oxígeno derivado de especies como el radical libre hidroperóxido ($\text{HO}_2^\bullet$) no se recombina rápidamente en formas neutrales, por lo que representa una forma más estable con una vida suficientemente larga para migrar hacia el núcleo, donde provoca el daño. La transferencia de un radical libre a una molécula biológica puede ser tan nociva como para causar rupturas de uniones o desactivación de funciones clave. Asimismo, el radical libre orgánico peroxi puede transmitirse de molécula a molécula y causar daño en cada encuentro, por lo tanto, puede tener lugar un efecto acumulativo mayor que la simple ionización o ruptura de uniones.

Los efectos bioquímicos de las radiaciones ionizantes ocurren a nivel de los ácidos nucleicos, especialmente el ADN, los cuales son el blanco primario del daño celular causado por la radiación. Las rupturas de sus cadenas interrumpen la función molecular de distintas maneras, pueden alterar la transcripción del código genético, así como la síntesis de la cadena del código (la imagen duplicada en espejo de la secuencia de bases); en muchos casos, la ruptura de la doble cadena del código puede ser reparada por enzimas como la ADN polimerasa y la ADN ligasa, que detectan los sitios de ruptura y los corrigen. Las rupturas tienen menos probabilidad de ser reparadas antes de la mitosis y durante la transcripción y replicación, es decir, cuando la molécula de ADN existe en forma de cadena simple; asimismo, puede suceder una reparación incorrecta si una base es reemplazada por otra diferente o cuando las enzimas reparadoras realizan una lectura equivocada. Cabe apuntar que el daño por radiación producido a la estructura de la cromatina es

el mayor factor en la muerte de células reproductoras, así como de mutaciones que conducen a efectos genéticos y carcinogénicos.

Es importante considerar que los efectos dependen del área corporal expuesta y de la distribución de la dosis en el interior del organismo, en este sentido es fundamental el concepto de radiosensibilidad, pues indica la mayor o menor afectación celular de los diversos tejidos bajo la acción de las radiaciones ionizantes. La radiosensibilidad se rige por las leyes de Begornie y Tribondeau, las cuales establecen que la respuesta del tejido a la radiación se manifiesta en función del número de células indiferenciadas en el tejido, el número de células mitóticas activas y la cantidad de tiempo que las células permanecen activas en proliferación (Galle & Paulin, 2003). Los radiobiólogos mencionados han demostrado la causa de que las células indiferenciadas o en proceso de diferenciación sean destruidas fácilmente por la radiación: cuanto más tiempo permanecen las células en proliferación activa, mayor es la sensibilidad a la radiación.

Asimismo, existen diversos factores ambientales capaces de modificar, en general, el grado de daño debido a radiación. Estos factores físicos incluyen tasa de dosis y fraccionamiento, calidad de la radiación y temperatura. A este respecto, es importante señalar que varias sustancias químicas también pueden modificar el efecto de la radiación.

a) Tasa de dosis y fraccionamiento. En general, el sistema biológico se torna más resistente cuando la tasa de entrega de la dosis de radiación es menor y mayor el tiempo transcurrido entre las exposiciones. Se cree que reparaciones de las lesiones subletales pueden ocurrir antes de que se sumen lesiones nuevas, cuya acumulación es letal. El sometimiento de la estructura celular a eventos de irradiación muy próximos entre sí, probablemente producirá daño letal en el ADN o en la estructura de la cromatina. En cambio, si los eventos se separan por un periodo suficientemente largo, tendrá lugar la reparación natural celular. En el ADN una ruptura

simple puede ser reparada, mas la ruptura de ambas cadenas es, en general, irreparable. Sin embargo, si las dos rupturas ocurren en lapsos considerables de separación, la reparación aún es posible; asimismo, si la ruptura sucede en diferentes puntos de la molécula, el ADN no se romperá y también existirá posibilidad de reparación.

b) Calidad de las radiaciones. En su travesía a través de la materia, las radiaciones con una alta TLE depositan grandes cantidades de energía por unidad de distancia, por lo que la posibilidad de múltiples lesiones en un corto periodo es muy alta, de tal suerte que para la misma dosis total, las radiaciones con un alto TLE son más letales que aquellas con niveles bajos.

c) Temperatura. Las células son sensibilizadas al daño por radiación a altas temperaturas y varias aberraciones cromosómicas aumentan a bajas temperaturas. Lo anterior se debe a la supresión de los procesos de reparación a bajas temperaturas y por efectos de la destrucción celular, los tejidos a altas temperaturas presentan mayor radiosensibilidad.

d) Modificaciones químicas. Las sustancias naturales o adicionadas pueden modificar la sensibilidad a la radiación si se encuentran presentes en las células y tejidos antes de la exposición. Los agentes radiosensibilizadores, como el oxígeno, aumenta en los tejidos la estabilidad y toxicidad de los radicales. El tejido normal no es afectado de manera significativa por el incremento de la presión del oxígeno; sin embargo, las células tumorales existentes en varios estados de oxigenación, que incluye una gran población en hipoxia, se sensibilizarán con la elevación de la presión del elemento. Un problema práctico consiste en que el oxígeno difunde solamente hasta 150 μm más allá de la pared capilar, por tanto, es ineficiente para alcanzar muchas células hipóxicas situadas a mayor distancia. Otras sustancias pueden aumentar el daño por radiación, por ejemplo, los nitroimidazoles, grupo de fármacos con efecto antimicrobiano y antiprotozoario que incrementan la radiosensibilidad celular; si bien el potencial de sensibilización de estos fármacos es menor al del oxígeno, sus componentes se pueden difundir a

través de la pared capilar e introducirse en el volumen tumoral vía aguja o catéter, aunque se debe tener en cuenta que son neurotóxicos.

Por otro lado, existen los agentes radioprotectores, aquellos que al contacto previo a la irradiación disminuyen el efecto de la misma. Se cree que protegen a las células, pues remueven los radicales libres, producen hipoxia e inhiben temporalmente la síntesis de ADN, reacción que brinda tiempo a las enzimas reparadoras para completar la reparación del daño, entre estos se encuentran los compuestos sulfhidrilo, de los cuales se destaca la amifostina (Ethyol).

Las radiaciones ionizantes también generan efectos específicos sobre los sistemas biológicos; cabe recordar que las células indiferenciadas, con rápida división, son las más sensibles a los efectos de la radiación.

a) Sistema hematopoyético. Las células del sistema hematopoyético y del sistema linfático son altamente sensibles al daño por radiación. Las células madre o precursoras de la médula ósea son las afectadas, normalmente son generadoras de todas las células sanguíneas circulantes y plaquetas, así como al tejido linfático del bazo, hígado, ganglios linfáticos y timo. Los glóbulos rojos maduros y las plaquetas circulantes son particularmente resistentes, lo cual se debe a la ausencia de núcleo. Los linfocitos circulantes son bastante sensibles, por lo que una caída en el valor normal puede indicar los niveles de radiación. Los efectos por daño a las células precursoras son perceptible días o semanas después, cuando las células maduras (resistentes a la radiación) se remueven de la circulación, lo cual provoca como efecto la pancitopenia (depresión de todas las estirpes celulares), resultante en hemorragia por reducción plaquetaria, infección por depresión de los glóbulos blancos y anemia por la caída en la producción de glóbulos rojos.

b) Sistema reproductor. En el hombre, las células precursoras de los testículos y las espermatogonias proliferativas son altamente sensibles; sin embargo, el espermatozoide maduro muestra una resistencia considerable, del mismo modo que las células intersticiales de las glándulas

mencionadas, las cuales controlan la producción hormonal y los caracteres secundarios. Así, una dosis capaz de generar esterilidad, no afectará el comportamiento masculino, por lo tanto, la imposibilidad para fecundar no se detectará de forma inmediata, sino algunos meses después, pues la espermatogénesis tiene un periodo de formación de 64 a 72 días y las formas maduras son resistentes; no obstante, se puede producir un daño genético hereditario. Aunque las dosis bajas pueden generar esterilidad, en general el efecto es temporal y el recuento de espermatozoides se normaliza en uno o dos años.

En la mujer, la radiación destruye el óvulo y el folículo maduro, lo cual reduce la producción hormonal, por lo que la esterilidad radiogénica puede estar acompañada de menopausia precoz con efecto significativo sobre las características sexuales. La dosis total, la tasa de dosis y la edad son importantes, pues las mujeres jóvenes tienen mayores posibilidades de recuperar la fertilidad que aquellas de edad más avanzada.

c) Sistema gastrointestinal. El tracto es muy sensible a las radiaciones. Tras una irradiación, el primer cambio observado ocurre en el revestimiento epitelial del intestino delgado. Los efectos del daño intestinal incluyen diarrea con la consiguiente pérdida de fluidos y electrolitos; mientras que la afectación al tracto superior se manifiesta con hematemesis y disminución de la secreción ácido-péptica. La destrucción del recubrimiento epitelial de la faringe y el esófago resulta en resequedad, pirosis y disfagia (dolor e inflamación de garganta).

d) Piel. Es relativamente radiosensible, ya que el efecto radiobiológico depende de la dosis total, la tasa de dosis y el tipo de radiación. Los efectos biológicos sobre la piel incluyen eritema y depilación temporal. Las dosis muy altas provocan depilación definitiva y destrucción de vasos sanguíneos, glándulas sebáceas y sudoríparas. La respuesta de la piel a la radiación ionizante se conoce como dermatitis rádica.

e) Sistema nervioso central. Generalmente es resistente al efecto de las radiaciones, se requieren dosis muy altas para causar efectos a nivel cerebral y en el sistema nervioso. La vasculatura constituye el factor limitante para la irradiación al sistema nervioso central y los nervios periféricos son altamente resistentes a los efectos de la radiación.

f) Cristalino. Con dosis bajas se puede dañar significativamente el cristalino y generar cataratas (opacificación definitiva del cristalino); el periodo de latencia es de 2 a 35 años.

g) Otros órganos muestran una radioresistencia relativa como el hígado, el corazón y los pulmones, entre otros. En general, las estructuras más sensibles de estos órganos son el tejido conectivo y el vascular, aunque con dosis altas se puede causar daño funcional.

h) Feto. El feto constituye un sistema altamente proliferativo con gran cantidad de células indiferenciadas, por lo tanto es extremadamente sensible a los efectos de la radiación, incluso con dosis relativamente bajas; no obstante, los efectos no dependen únicamente de la dosis, sino también de la edad gestacional al momento de la irradiación: en el primer trimestre el daño es mayor y, a menudo, causa aborto espontáneo; durante el desarrollo y diferenciación de los órganos, la irradiación resultará en una mayor incidencia de malformaciones orgánicas congénitas o teratogénicas.

i) Irradiación de cuerpo entero. En los humanos, la irradiación aguda prolongada de cuerpo entero resulta en un complejo conjunto de síntomas clínicos conocidos, colectivamente, como *síndrome de irradiación aguda*, cuya patología exacta es dosis dependiente. No obstante, es posible reconocer cuatro etapas: 1) una fase inicial o prodrómica en la que existe una respuesta de shock en las horas inmediatas posteriores a la irradiación, con síntomas de fatiga, depresión, hiperhidrosis, disnea de grandes esfuerzos, hematemesis, diarrea y taquicardia (aumento de la frecuencia cardíaca); 2) un periodo de latencia en el que la población de células viables radioresistentes mantienen sus funciones, puede prolongarse hasta por tres semanas y se

acompaña de eritema en la piel, alopecia (caída del cabello), trombocitopenia y melena (presencia de sangre en las heces); 3) la enfermedad manifiesta o fase de estado, esto es, la etapa en que aparecen los síntomas debido a la disminución de la población de células viables como resultado de la destrucción de las precursoras y a la no renovación de la producción celular, la clínica de este periodo involucra al sistema hematopoyético, al intestino y al sistema nervioso central, así como existe alto riesgo de hemorragias e infecciones; 4) y la fase de desenlace o de recuperación, la cual, en función del grado de deterioro sufrido, tiene como consecuencias la recuperación o la muerte.

Asimismo, en la *irradiación aguda* se distinguen tres tipos de síndromes, los cuales se describen a continuación de acuerdo con el orden cronológico en el que presentan su fase de desenlace:

- a) Síndrome hematopoyético. Aparece después de una exposición a una dosis de 3 Gy; se caracteriza por una depresión de la médula ósea y las consecuencias fisiológicas que ello conlleva. La muerte puede ocurrir entre el primer y el segundo mes tras la exposición.
- b) Síndrome gastrointestinal. Se presenta cuando ha existido una exposición de 8 Gy o superior y es consecuencia de la descamación del epitelio intestinal; asimismo, se manifiestan todos los signos y síntomas del síndrome hematopoyético. La muerte ocurre dentro de la primera o segunda semana después de la exposición.
- c) Síndrome del Sistema Nervioso Central. Cuando la exposición es superior a 50 Gy, a los pocos minutos se produce un estado de inconsciencia y, en cuestión de horas o días, la muerte. Cabe señalar que el sistema puede verse afectado a partir de los 15 a 20 Gy.

Por otro lado, se ha demostrado que organismos expuestos a radiaciones ionizantes pueden presentar leucemia y tumores sólidos (malignos y benignos). El mecanismo exacto del

cáncer radiogénico, y en realidad de todos los cánceres, no es bien comprendido aún. Muchas teorías han sido planteadas, algunas de ellas basadas en el hecho de que en todos los organismos existen genes cancerígenos u oncogenes y supresores que previenen su manifestación. Las causas de cáncer radiogénico incluyen el daño de los genes supresores radioactivos al azar, lo cual posibilita la manifestación de los oncogenes, la mutación de genes normales en oncogenes por daño subletal de la radiación y la supresión del sistema inmunitario, que normalmente neutraliza la formación de células cancerosas, debido a altas dosis de radiación.

La leucemia, como efecto crónico de la exposición a las radiaciones, fue reconocida en los primeros médicos radiólogos y en sobrevivientes de las bombas atómicas. Si bien no se ha demostrado una relación lineal entre bajas dosis e inducción de leucemia, como en el cáncer, se asume que esta relación existe.

Por su parte, el desarrollo de tumores malignos sólidos luego de la exposición a la radiación es un efecto conocido. El riesgo no puede ser demostrado en el caso de dosis bajas por carencia de datos; los números de riesgo han sido derivados de poblaciones expuestas a altas dosis. Dado que la incidencia de cáncer en la población es alta y la del cáncer radiogénico es baja, para demostrar un aumento en la incidencia de este último tipo de cáncer se necesitarían grandes poblaciones de personas expuestas. A su vez, debido a que todos los cánceres asociados con radiaciones ocurren también en ausencia de radiación, es imposible demostrar una relación causa-efecto definitiva. Sin embargo, se asume que, en dosis bajas, la tasa de dosis no es relevante como factor de riesgo, sino, únicamente, se considera importante la dosis total, lo cual implica que respecto al cáncer, la dosis de radiación es acumulativa en su efecto.

No toda la radiación es perjudicial, de hecho el beneficio obtenido por el uso médico de las radiaciones (radiología, medicina nuclear y radioterapia) supera ampliamente el riesgo teórico de los individuos expuestos. No obstante, la cuestión de la exposición a las radiaciones,

ocupacional o de diagnóstico médico, debe abordarse desde en una perspectiva adecuada y legislada.

2.6 Características de los radioisótopos usados en medicina nuclear

En el campo médico, las actividades laborales que implican exposición a radiaciones ionizantes son las que cubren médicos nucleares, físicos médicos, personal técnico y de enfermería. En medicina nuclear se emplean fuentes abiertas con radioisótopos de corto tiempo de semidesintegración, que se administran por inoculación u oralmente al paciente con fines de diagnóstico o tratamiento.

Asimismo, toda persona que por sus tareas tenga acceso a las zonas controladas o adyacentes puede también resultar expuesta, por ello debe considerarse también la exposición ocupacional de las personas que trabajan en la fabricación de equipos y fuentes, así como en su calibración y mantenimiento (Gestal, 2001).

Los radiofármacos para diagnóstico están compuestos por un radionucleído emisor de radiación procedente del núcleo del átomo (gamma o positrones) unido a una molécula (marcaje) cuyo comportamiento biológico dentro del organismo es el adecuado para el estudio morfológico y funcional de un órgano o tejido específico. Una vez administrado el radiofármaco, este se distribuye en el paciente con propiedades cinéticas influenciadas por la situación fisiopatológica del organismo. La emisión radiactiva permite detectar este comportamiento sin alterar el medio en el que se encuentra.

A continuación se detallan los principales radiofármacos empleados actualmente en los servicios de medicina nuclear con fines de diagnóstico para los diferentes sistemas del organismo.

Sistema nervioso. Están autorizados radiofármacos de tecnecio-99m marcando la exametazima y el bicisato; también se utiliza el yodo 123 marcando el ioflupano, cuya solubilidad les permite atravesar la barrera hematoencefálica y metabolizar un 10% de la dosis administrada en el cerebro; el resto de actividad sigue una ruta de excreción por vía urinaria y entérica. Su eficacia radica en estudios de perfusión cerebral y su seguridad se establece en índices de dosimetría aceptables (inferiores a 8 mSv/exploración); no presentan contraindicaciones importantes y se acepta su administración con un control de calidad superior al 90%.

Sistema renal. Dispone de diferentes radiofármacos de tecnecio 99m, marcando el ácido dimercaptosuccínico (DMSA), el ácido dietilaminopentacético (DTPA), o bien, la betiatida (MAG3). Su eficacia diagnóstica radica en que permiten obtener imágenes del parénquima renal, así como posibilitan la obtención de imágenes dinámicas y morfológicas al ser, a la vez, eliminados específicamente por filtrado glomerular y representativos del flujo plasmático renal.

El edetato (EDTA), marcado con cromo 51 es también un emisor gamma que permite valorar el filtrado glomerular. Con dosimetrías inferiores a 2 mSv/exploración no presenta contraindicaciones de interés y tiene un control de calidad con un porcentaje superior al 95%.

Sistema reticuloendotelial. Emplea radiofármacos marcados con tecnecio 99m. Su eficacia radica en el carácter coloidal de la molécula, según su tamaño, permite estudiar el sistema reticuloendotelial (hígado, bazo, médula ósea), o bien, valorar los vasos linfáticos. En el primer caso se administra por vía endovenosa y, en el segundo, por vía subcutánea. Su dosimetría es del orden de 5 mSv/exploración y presenta controles de calidad superiores al 95%.

Sistema cardiovascular. Utiliza diferentes radiofármacos marcando radioisótopos de tecnecio, talio y emisores de positrones cuya característica común consiste en que son captados en un alto porcentaje por el miocito. Se emplean la tetrofosmina y el metoxiisobutilisonitril,

MIBI; el talio 201 en forma de cloruro tiene un comportamiento similar al potasio, asimismo, el amonio 13 se usa como radioisótopo emisor de positrones.

Los eritrocitos marcados con tecnecio 99m sirven para valorar la fracción de eyección del ventrículo izquierdo; es eficaz en la valoración de zonas isquémicas del miocardio, en la evaluación de su funcionalidad, así como en el examen de condiciones de estrés y reposo del paciente. Respecto al resto, la dosimetría del talio 201 representa la más alta, por lo cual ha sido desplazado en la práctica clínica por los radiofármacos de tecnecio 99m, cuyos controles de calidad son superiores al 95%.

Sistema pulmonar. La eficacia del diagnóstico con radiofármacos en el pulmón radica en que permite valorar dos funciones distintas según la vía de administración: la ventilación alveolar y la perfusión sanguínea del parénquima. En el primer caso, se administra el radiofármaco por vía inhalatoria en forma de aerosol y se obtienen imágenes de su distribución alveolar. En la práctica se utilizan aerosoles de tecnecio 99m marcando el dietilaminopentacético, o bien, radioisótopos de gases nobles como el xenon 133 y el criptón 81m.

Por su parte, la perfusión sanguínea pulmonar se determina a través de la administración intravenosa de macroagregados de albúmina humana marcada con tecnecio 99m, los cuales se sitúan en los capilares del parénquima pulmonar y permiten obtener las imágenes correspondientes.

Sistema óseo. El principio activo del radiofármaco suele ser un complejo fosforado que se ubica en los huesos por fenómenos de adsorción sobre los cristales de hidroxapatita; las áreas de mayor actividad osteogénica suelen captar mayor cantidad de radiofármaco, hecho que se traduce en una definición más intensa en la imagen gammagráfica del hueso. Cerca del 50% de la actividad se elimina a través de la orina y su eficacia diagnóstica reside en la diferenciación de las distintas patologías del hueso, desde la localización de infección hasta la determinación de

metástasis óseas derivadas de diferentes neoplasias. Su seguridad dosimétrica se expresa en 6 mSv/exploración, por lo que su administración en pacientes con hipocalcemia debe ser valorada. Al igual que el resto de radiofármacos marcados con tecnecio 99m, posee una alta pureza radioquímica superior al 90%.

Sistema endocrino. Utiliza radiofármacos del tecnecio 99m y de diferentes radioisótopos del yodo (123 y 131), así como otros radionucleídos como el indio 111. El tecnecio 99m en forma de pertecnato se distribuye dentro del organismo, sobre todo en la glándula tiroides, estómago y plexos coroideos, por lo que su eficacia diagnóstica radica en las diferentes patologías que cursan con afectaciones de estas áreas. Radiofármacos del yodo 123 y el yodo 131, como la sal sódica, son empleados en la valoración de tiroides, pues se metabolizan específicamente en esta glándula. Si bien las dosimetrías de las dosis radiactivas absorbidas por el organismo son más altas para los radioisótopos del yodo, estas continúan en uso dada su mejor especificidad metabólica.

Sistema hematológico. Normalmente utiliza el marcaje de las diferentes células sanguíneas mediante varios radiofármacos marcados con cromo 51, tecnecio 99m e indio 111. Básicamente, el marcaje se realiza con la obtención de una muestra sanguínea del paciente, la cual es sometida a purificación o enriquecimiento de la muestra en la célula de interés, así como a marcaje y purificación posteriores, antes de su readministración al paciente. Su eficacia diagnóstica varía según el tipo de célula marcada y su función dentro del organismo. Permite la visualización de los vasos sanguíneos, por lo que se usan para la determinación de la volemia, masa celular (cromo 51), la función ventricular y sangrados ocultos (tecnecio 99m).

A continuación se detallan los principales radiofármacos empleados actualmente en los servicios de medicina nuclear con fines terapéuticos.

Se trata de fármacos cuyo componente radioactivo es un emisor beta. La irradiación de este tipo se caracteriza por producir daño celular debido a su carácter corpuscular y a que cede su

energía al medio en el que se encuentra. Una vez administrado y ubicado en la célula o zona patológica de interés, la energía cedida provoca el efecto terapéutico deseado.

Ahora bien, existen diferentes clases de terapia determinadas de acuerdo con su biodistribución, mismas que se explican brevemente a continuación.

Antiinflamatoria. Se vale de radiofármacos marcados con itrio 90, erbio 169, renio 185 y oro 198 para marcar moléculas de característica coloidal que se administran en cavidades corporales; precisamente, el carácter coloidal les permite permanecer dentro del recinto en el que se han administrado sin difundirse fuera de él.

Metabólica. Se aprovecha la metabolización de otros radiofármacos para hacer llegar al área de interés su acción terapéutica, en este caso los marcados con yodo 131, estroncio 89 y samario 153. El yodo 131, en forma de yoduro sódico, se metaboliza en un 35% en la glándula tiroides, el resto es eliminado, en su mayor parte, a través de la orina. Este radiofármaco es el más empleando en los servicios de medicina nuclear y las patologías de interés para su administración son las neoplasias de la glándula y su hiperfunción.

2.7 Diagnóstico y tratamiento de enfermedades en medicina nuclear

Desde hace más de 40 años, los isótopos radiactivos producidos artificialmente a partir de diversos elementos químicos se emplean en medicina para diagnóstico, tratamiento e investigación. La diversidad y la importancia de sus aplicaciones han aumentado con gran rapidez a lo largo del último decenio.

En el caso de los procedimientos en medicina nuclear su objetivo consiste en obtener información diagnóstica por medio de la observación y registro de la distribución en el organismo de trazadores específicos administrados al paciente y detectados mediante equipos especiales.

En esta área médica existen dos métodos de diagnóstico:

- Los métodos diagnósticos in vitro utilizan sustancias radiactivas para la realización de análisis de laboratorio en los que a partir de una muestra, de sangre u orina por ejemplo, pueden determinarse y cuantificarse concentraciones de hormonas o anticuerpos que indican la existencia de una enfermedad específica. Dentro de este método se destaca la técnica de medicina nuclear conocida con el nombre de radioinmunoanálisis (RIA), la cual se emplea para la determinación cuantitativa de hormonas u otras sustancias. Cuando, para realizar la técnica de RIA, se aplica un anticuerpo en particular se le denomina radioinmunoensayo.

La ventaja esencial del RIA, en comparación con los procedimientos tradicionales químicos o biológicos, consiste en su gran sensibilidad; por ejemplo, su uso permitió, por vez primera, determinar cuantitativamente una serie de hormonas y fármacos existentes en el suero de la sangre o en la orina en concentraciones extremadamente bajas. Por otra parte, es evidente la utilidad de las técnicas de RIA para todos los pacientes y, en particular, en casos de mujeres embarazadas o que se encuentran en lactancia, pues no es necesario exponer al paciente a las radiaciones para obtener información diagnóstica de gran utilidad.

Estas técnicas se utilizan en el diagnóstico de múltiples enfermedades como aquellas de la glándula tiroides y la placenta, así como lesiones de mamas, hígado, ovario, pulmón, colon, recto, próstata y testículos.

- Los métodos de diagnóstico in vivo consisten en administrar un radiofármaco directamente al paciente (ya sea por vía oral, intravenosa u otra) de manera que esta se aloje en el órgano o tejido a estudio para obtener, mediante el equipamiento médico

adecuado, información morfológica, imágenes de los procesos metabólicos e, incluso, datos cuantitativos sobre el rendimiento de los órganos estudiados o de sus funciones principales.

Con fines diagnósticos, en medicina nuclear se emplean, generalmente, los radioisótopos que se desintegran en forma de radiación gamma, pues, debido a su alto poder de penetración, puede captarse la acumulación de pequeñas cantidades de radioisótopos en los órganos y tejidos con un equipo detector situado en el exterior del cuerpo humano.

Existen dos mecanismos en los cuales se fundamenta la medicina nuclear in vivo:

- a) En determinados procesos metabólicos el organismo no puede diferenciar entre el elemento estable y su isótopo radiactivo, por lo tanto, cuando se administra al paciente un isótopo radiactivo, este será metabolizado de forma análoga al elemento no radiactivo correspondiente. Este mecanismo permite que tanto el isótopo radiactivo, como el no radiactivo se acumulen en determinado órgano o tejido, de manera que el isótopo radiactivo sirva para realizar diagnóstico o tratamiento del órgano o tejido en cuestión.
- b) Ciertas moléculas portadoras tienen afinidad por un órgano o tejido del cuerpo, cuando estas son marcadas (unidas químicamente) previamente con un isótopo radiactivo, al ser administradas al paciente, las moléculas y el isótopo radiactivo al que se han unido, se depositan en el órgano o tejido en estudio de manera que se puede realizar su diagnóstico. En ambos casos, para llevar a cabo los estudios en medicina nuclear, las sustancias radiactivas se utilizan en tan pequeñas cantidades que

no producen ninguna influencia en el metabolismo normal ni resultan tóxicas o peligrosos para el paciente.

Por su parte, las exploraciones diagnósticas del servicio de medicina nuclear se dividen en tres grandes áreas:

- Gammagrafía o centellografía (estática y/o dinámica). Técnica que permite realizar exploraciones morfo-funcionales de carácter estático y/o dinámico en las que se utilizan trazadores marcados con isótopos convencionales.
- Tomografía Computarizada de Fotón Único (SPECT). Esta técnica ofrece una reconstrucción tridimensional del paciente, provee información más precisa de órganos y estructuras anatómicas más complejas o de difícil diagnóstico para la gammagrafía convencional.
- Tomografía por Emisión de Positrones (PET). Este método, que comenzó a emplearse durante los años 80, es el más novedoso, en él se utilizan trazadores de vida ultra corta marcados con isótopos emisores de positrones (^{18}F) elaborados en la unidad de radiofarmacia PET de medicina nuclear. En la imagen que posibilita solo considera los fotones generados en el mismo instante, dirección y sentidos opuestos. Fundamentalmente, se aplica en oncología, neurología y cardiología; es primordial en la detección de la extensión y agresividad de los tumores o neoplasias, además de indicaciones concretas en el estudio metabólico de órganos como el hígado o procesos infecciosos de difícil diagnóstico.

La información antes expuesta sirve para abordar los procedimientos frecuentes en el servicio de medicina nuclear y su aplicación.

Gammagrafía ósea. Es una exploración del sistema óseo, también llamada rastreo óseo, que permite detectar alteraciones funcionales en fases aún no observables en una radiografía convencional. Este procedimiento juega un papel importante en el estudio de las metástasis óseas.

Indicaciones. Tumores óseos primitivos benignos o malignos, osteomielitis, sacroileítis, osteodistrofia renal, dolor lumbar o de otra localización de causa no aclarada, fractura de stress, traumatismos, algoneurodistrofia, osteonecrosis aséptica, estudio del cartílago de crecimiento (trastornos fisarios), síndrome del niño maltratado, infartos óseos (drepanocitosis) y enfermedad de Paget.

Fundamento. El radiotrazador fosfatado es adsorbido a los cristales de hidroxapatita de calcio del tejido óseo. La intensidad de fijación es proporcional al grado de actividad osteoblástica, la cual aumenta en toda lesión ósea como un mecanismo de reparación.

Radiofármacos: ^{99m}Tc -MDP (metil di fofonato), ^{99m}Tc -HMDP o ^{99m}Tc -HDP.

Dosis: adulto 25 - 30 mCi (925 - 1110 MBq) para 70 Kg de peso.

Forma de administración. Se inyecta por vía intravenosa; no requiere cuidados especiales; cabe mencionar que para la técnica de primer pasaje se inyecta en forma de bolo.

Gammagrafía pulmonar. Se utiliza en caso de obstrucción o trombosis en las arterias pulmonares. Es el primer método de diagnóstico para detectar la embolia pulmonar.

a) Centellografía pulmonar por perfusión.

Indicaciones. Diagnóstico de tromboembolia pulmonar, evaluación preneumonectomía de la función pulmonar regional y malformaciones.

Fundamento. Explora la circulación pulmonar; la captación del radiotrazador es proporcional al flujo sanguíneo regional del pulmón. Las partículas de albúmina marcadas

presentan un diámetro capaz de ocluir la luz de las arteriolas terminales y capilares pulmonares, lo cual causa una microembolización al azar. La distribución es proporcional al flujo sanguíneo pulmonar y no ocasiona trastornos hemodinámicos significativos, salvo en pacientes con insuficiencia respiratoria severa.

Radiofármaco: ^{99m}Tc -MSA (microesferas de albúmina) o ^{99m}Tc -MAA (macroagregados de albúmina).

Dosis: adulto 7 mCi (259 MBq) para 70 Kg de peso.

Forma de administración. Intravenosa en forma de bolo sin mezclar con sangre. Se solicita al paciente que inspire profundamente en el momento de la inyección y, después, que vuelva a inspirar profundamente de tres a cuatro veces; se debe mantener en alto el brazo inyectado durante algunos segundos. La inyección debe ser administrada con el paciente en decúbito dorsal y la jeringa, con la dosis, debe ser agitada continuamente a fin de evitar la precipitación de las partículas.

b) Centellografía pulmonar por inhalación.

Indicaciones. Estudio complementario para el diagnóstico de tromboembolia pulmonar.

Fundamento. Se evalúa la función ventilatoria mediante la administración de partículas de radioaerosol por vía inhalatoria a través de un micronebulizador; las partículas alcanzan los bronquiolos terminales y alvéolos de forma que la captación pulmonar es proporcional a la ventilación regional del pulmón.

Radiofármaco: ^{99m}Tc -DTPA aerosol (ácido dietilen triamino pentacético).

Dosis: el paciente inhala hasta que se alcance una dosimetría de 2.5 mR/h en las bases pulmonares.

Forma de administración. Vía inhalatoria por medio de un micronebulizador; el paciente debe estar sentado.

Gammagrafía tiroidea. Es la representación en una imagen de la forma y función de la glándula tiroides. Mediante este estudio puede comprobarse el aumento en el tamaño de la tiroides (bocio) o visualizar la existencia de algún nódulo en su interior. Ejemplos:

a) Gammagrafía o centellograma tiroideo con $^{99}\text{TcO}_4$

Indicaciones. Bocio difuso, uninodular, multinodular, mediastinal (Plongeant), quiste tirogloso y tumoración de cuello de origen indeterminado.

Fundamento. El anión pertecneciato es captado por la célula tiroidea mediante un mecanismo de membrana, similar al del anión yoduro aunque no es organificado. El grado de captación es dependiente del estado funcional de la glándula.

Radiofármaco: $^{99}\text{TcO}_4$ (pertenecniato).

Dosis: adultos 5 mCi (185 MBq) para 70 Kg.

Forma de administración. Intravenosa; no requiere cuidados especiales.

b) Gammagrafía o centellograma tiroideo con ^{131}I

Indicaciones. Bocio uninodular hipercaptante con ^{99}Tc y endotorácico.

Fundamento. El radiotrazador, bajo forma de yoduro, es captado y organificado por las células tiroideas en proporción al estado funcional de la glándula.

Radiofármaco: $^{131}\text{I}\text{Na}$ (yoduro de sodio).

Dosis: adulto 150 - 200 μCi (555 – 740 Bq).

Forma de administración. Vía oral.

c) Gammagrafía o centellograma tiroideo con MIBI.

Indicaciones. Se utiliza cuando existe inhibición farmacológica de la glándula, por lo cual no se podría utilizar $^{99}\text{TcO}_4$ o ^{131}I . Si se realiza un centellograma tiroideo con yodo o tecnecio y no hay captación, se puede hacer de inmediato otro con MIBI y en bocio nodular para investigar posible etiología maligna.

Fundamento. El MIBI es incorporado a la glándula por medio de difusión pasiva, queda retenido por gradiente de concentración.

Radiofármaco: ^{99}mTc -MIBI (6 – metoxi – isobutil – isonitrilo)

Dosis: adultos 10 mCi (370 MBq) para 70 Kg.

Forma de administración. Intravenosa; no requiere cuidados especiales.

SPECT cerebral. Se realiza para valorar el flujo sanguíneo en las distintas áreas cerebrales; proporciona información acerca del funcionamiento del cerebro. Es de gran utilidad en el diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer, tumores cerebrales, demencias y epilepsia.

SPECT cardiaco: Se realiza para valorar el flujo sanguíneo del miocardio. En reposo, permite detectar zonas musculares necróticas (a causa de un infarto de miocardio). Si se efectúa tras estímulos físicos o farmacológicos, permite detectar áreas miocárdicas en hipoperfusión (isquemia coronaria). Asimismo, posibilita la valoración de la repercusión funcional de las alteraciones anatómicas y se utiliza para seleccionar a los pacientes que deben someterse a un cateterismo cardiaco.

Gammagrafía o centellografía de miocardio (diagnóstico de infarto agudo del miocardio)

Indicaciones. Diagnóstico de IAM en pacientes con electrocardiograma de difícil interpretación o discordancia clínica-electrocardiográfica-enzimográfica en preoperatorio de cirugía cardíaca; diagnóstico de contusión miocárdica y de amiloidosis cardíaca.

Fundamento. Los compuestos fosfatados se adsorben a los cristales de calcio depositados en el tejido miocárdico necrosado, fenómeno que ocurre entre las 24 hrs. y los 7 días posteriores al episodio agudo (máximo entre 48 y 72 hrs.).

Radiofármaco: ^{99}mTc -PyP (pirofosfato).

Dosis: adulto 30 mCi (1110 MBq) para 70 Kg. de peso.

Forma de administración. Intravenosa; no requiere cuidados especiales.

Renograma isotópico. Permite detectar el funcionamiento fisiológico del sistema renal.

Es el único método no invasivo para medir la función renal individual.

Gammagrafía renal: Esta exploración permite obtener una información morfológica de ambas siluetas renales y conocer, con gran precisión, el porcentaje de función que corresponde a cada una. Su aplicación es de gran interés en las infecciones renales pediátricas, trasplantes y urología, entre otros. Ejemplos:

a) Seriocentellografía renal

Indicaciones. Diagnóstico de hipertensión renovascular, de uropatía obstructiva (hidronefrosis), traumatismo renal, evaluación de trasplante, malformación congénita y litiasis renal.

Fundamento. El radiotrazador, inyectado por vía intravenosa, permite observar el funcionamiento de los riñones (llegada del radiofármaco, filtrado, tránsito y acumulación en la pelvis renal, eliminación hacia los uréteres y la vejiga). El DTPA es un agente de filtrado glomerular, el MAG3 es un agente de secreción tubular. Es posible estudiar tres fases: vascular, parenquimatosa y eliminación.

Radiofármacos: ^{99m}Tc -DTPA (ácido dietilen triamino pentacético) y ^{99m}Tc -MAG3 (mercapto acetil triglicina).

Dosis: adulto 10 mCi (370 MBq) para 70 Kg de peso.

Forma de administración. Intravenosa, en forma de bolo con el paciente colocado bajo cámara.

b) Centellografía renal (con estudio de función renal por separado).

Indicaciones. Detección de cicatrices corticales renales en la pielonefritis, malformaciones renales (riñón en herradura), infecciones urinarias altas (pielonefritis aguda) y valoración prenefrectomía.

Fundamento. El radiotrazador es incorporado a la célula del túbulo proximal donde permanece fijado durante un lapso prolongado, lo cual permite obtener una imagen anatomofuncional de la corteza renal. El DMSA no se filtra en la nefrona, sino que se incorpora a las células tubulares y se fija en la corteza en forma proporcional a la función renal. Se puede valorar la función renal absoluta (en qué proporción participa cada riñón de la función renal total) y la función renal relativa (en qué proporción trabaja un riñón con respecto al otro).

Radiofármaco: ^{99m}Tc -DMSA (ácido dimercapto succínico).

Dosis: adulto 3 mCi (111 MBq) para 70 Kg de peso.

Forma de administración. Intravenosa, sin cuidados especiales.

Centellografía hepato-esplénica

Indicaciones. Evaluación morfológica y metástasis hepáticas, detección de lesiones focales, estudio de enfermedades hepáticas difusas y la detección oportuna de tumores, quistes o abscesos.

Fundamento. Las partículas coloidales marcadas son fagocitadas por las células del sistema retículo endotelial hepático (células de Kupffer) y esplénico, distribuidas homogéneamente en el hígado y bazo normales.

Radiofármaco: ^{99m}Tc -sulfuro coloidal.

Dosis: adulto 5 mCi (185 MBq) para 70 Kg.

Forma de administración. Intravenosa, sin cuidados especiales.

Centellografía de vías biliares

Indicaciones. Estudio del paciente icterico o colecistectomizado; diagnóstico de obstrucción completa o incompleta de vías biliares; estudio de colelitiasis y colecistitis en la vesícula biliar, detección de fístulas biliares, evolución de traumatismos abdominales, reflujo entero-gástrico y estudio de derivación bilio-digestiva.

Fundamento. El radiotrazador es retirado de la sangre por el hepatocito, eliminado a la luz intestinal por vía biliar.

Radiofármaco: ^{99}Tc -IDA (ácido imino diacético).

Dosis: adulto 5 mCi (185 MBq) para 70 Kg.

Forma de administración. Intravenoso, no requiere cuidados especiales.

Centellografía mamaria

Indicaciones. Diagnóstico de cáncer de mama (mamografía dudosa) y evaluación de extensión ganglionar del cáncer de mama (adenopatías axilares).

Fundamento. El radiotrazador se comporta como un marcador metabólico, se concentra en el tejido neoplásico maligno mamario y ganglios metastásicos con alto grado de sensibilidad y especificidad.

Radiofármaco: ^{99}Tc -MIBI (metoxi-isobutil-isonitrilo).

Dosis: adulto 20 mCi (740 MBq) para 70 Kg. de peso.

Forma de administración. Vía endovenosa del lado contralateral a la lesión. En caso de tumor mamario bilateral se debe inyectar de pie.

Capítulo 3. Estructura y funcionamiento de los servicios de medicina nuclear

En este capítulo abordamos la normatividad aplicable a los servicios de medicina nuclear, desde las características de sus instalaciones y procedimientos internos, hasta las características del personal que debe realizar las actividades.

En el primer apartado se exponen, brevemente, los lineamientos establecidos por la ley en materia nuclear de nuestro país, los cuales deben cumplir los servicios de medicina nuclear para la obtención de permisos y licencias que autoricen su operación.

En la segunda sección se explican los requerimientos normativos que deben cubrir las autoridades de la organización, así como la infraestructura primordial para la realización de procedimientos nucleares en este tipo de servicios.

Los requisitos que deben cumplir los servicios de medicina nuclear, en términos de seguridad e higiene, el diseño de las instalaciones, la vigilancia del personal ocupacionalmente expuesto, así como su capacitación y entrenamiento en las actividades que realiza, y los lineamientos de reconocimiento, evaluación y control del lugar de trabajo con apego a la normatividad vigente se abordan en el tercer apartado de este capítulo.

En cuarto lugar se analiza el marco económico del sector salud en el extranjero, las principales instituciones y programas de salud para la población de México, así como se brinda un panorama general del ámbito social de la medicina nuclear

Finalmente, en la quinta sección, se establece una guía de requerimientos básicos que es necesario conocer para realizar un manual de seguridad radiológica; asimismo, se plantean sugerencias sobre los temas que debe incluir el manual de protección civil para un servicio de medicina nuclear.

3.1 Licencias y permisos de funcionamiento

El uso de material radiactivo en nuestro país, en aplicaciones médicas, industria e investigación, data de varios años atrás, lo cual, en el campo de la medicina, ha contribuido beneficiosamente al diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades. No obstante, estas aplicaciones obligan a establecer medidas que reduzcan, a niveles tan bajos como razonablemente sea posible, los riesgos que implican para los trabajadores ocupacionalmente expuestos, para el público en general y para el ambiente.

El marco normativo de la energía nuclear en México parte de las disposiciones de los artículos 27 y 73 de la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*, conforme a las reformas establecidas en el *Diario Oficial de la Federación* del 9 de febrero de 1975. El primer artículo establece en su párrafo séptimo que: “Corresponde también a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos”. Por su parte, el artículo 73, en su fracción X, reserva a los poderes federales amplias funciones para legislar sobre energía nuclear.

Las autorizaciones son emitidas por la Secretaría de Energía cuando los permisos involucran acciones relacionadas con instalaciones nucleares o radiactivas, ya sea emplazamiento, diseño, construcción, operación, modificación, cese de operaciones, cierre definitivo o desmantelamiento. Dichas instalaciones deben contar con personal especializado en seguridad nuclear y radiológica, con un plan de emergencia radiológica y se debe evaluar el impacto potencial o actual en el medio ambiente (RGSR, 1975).

Por su parte, la posesión, enajenación, manejo, transporte y uso de materiales radiactivos, combustibles nucleares y equipos que lo contengan, requieren también autorización de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS); en el caso de servicios de

medicina nuclear es necesario el permiso de otra dependencia, como la Secretaría de Salud, pues los materiales son empleados con fines médicos.

Las inspecciones, auditorías, verificaciones y reconocimientos están encomendados a la CNSNS, órgano encargado del seguimiento de las deficiencias y anomalías que detecta, y con base en las cuales puede dictar sanciones como multas, suspensión y cancelación de las autorizaciones. Asimismo, esta entidad puede adoptar medidas de seguridad en caso de riesgo inminentes para el personal de las instalaciones radiactivas o para la sociedad en general, como retención, aseguramiento o depósitos de bienes radiactivos o contaminados; clausura temporal o definitiva, parcial o total, de las instalaciones nucleares o radiactivas e, inclusive, por decisión de la Secretaría de Energía, puede proceder a la ocupación temporal de inmuebles peligrosos.

Esta Comisión también tiene encomendadas las salvaguardias, las cuales consisten en un sistema nacional de registro y control de todos los materiales nucleares del país con el fin de verificar que estos no sean desviados, que sean empleados para usos pacíficos, que no sirvan a la manufactura de armas nucleares ni a otros usos no autorizados. Es pertinente recordar que la CNSNS fue creada en 1979 como órgano desconcentrado de la antigua Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, carácter con el cual subsiste como dependiente de la Secretaría de Energía. Esta Comisión está encabezada por un director general, nombrado por el secretario de energía, quien cuenta con un consejo consultivo integrado por representantes de dependencias de la administración pública federal, cuya misión consiste en brindar asesoramiento y prestar cooperación técnica. Las facultades de esta entidad son de diversos tipos, desde consultivas, de asesoría y recomendación; control, vigilancia, fiscalización y hasta normativas, de interpretación y de autoridad.

La necesidad de contar con normas básicas de protección, de observancia obligatoria, es el motivo de la instauración del Reglamento General de Seguridad Radiológica (RGSR), donde

se establecen los requerimientos técnicos para la organización del permisionario, fija sus responsabilidades, las funciones a cumplir respecto a protección radiológica; los criterios para el diseño, construcción y operación de las instalaciones, sistemas y equipos de las instalaciones radiactivas; así como los lineamientos para desarrollar y establecer procedimientos para el uso seguro de las fuentes de radiación, que incluye el entrenamiento del personal, y para la actuación en casos de emergencia. El Reglamento General de Seguridad Radiológica obedece, en primera instancia, al requerimiento legal establecido en la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional; en segunda, a los convenios internacionales que México ha suscrito con entidades como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), cuyas recomendaciones sirven de base a las disposiciones instauradas en el RGSR.

Figura 3. Jerarquización del Marco Regulador Nacional en Materia Nuclear



Fuente: Archivo CNSNS, 2013.

Las instalaciones radiactivas deben contar con las autorizaciones, licencias y permisos otorgados por los mencionados órganos reguladores competentes para el manejo de fuentes de radiación ionizante, que en el caso de la medicina nuclear incluyen: autorización para instalar fuentes de radiación ionizante, así como para dar servicio a equipos que la contengan y prestar servicios de protección radiológica; licencia de operación de instalaciones radiactivas; licencia

sanitaria para el establecimiento que utiliza fuentes de radiación con fines médicos o de diagnóstico, en la modalidad de rayos X, medicina nuclear y radioterapia, el cual también requiere el permiso del responsable de la operación y funcionamiento del mismo; permisos y licencias relacionados con desechos radiactivos; permiso del encargado de seguridad radiológica; y permiso del asesor especializado en seguridad radiológica para establecimientos de diagnóstico médico con rayos X.

En el Título Décimo de dicho reglamento, en su capítulo II, establece en el Artículo 219 que para solicitar permisos de construcción y licencias de operación, modificación, cese de operaciones, desmantelamiento o cierre definitivo de instalaciones radiactivas, los interesados deben presentar ante la Comisión la siguiente documentación: solicitud en la forma oficial correspondiente; copia del acta constitutiva de la empresa debidamente inscrita en el Registro Público de la Propiedad y de Comercio; informe de Seguridad Radiológica; manual de Seguridad Radiológica y fianza o caución de institución o empresa legalmente autorizada para garantizar daños a terceros.

Por su parte, el Artículo 221 establece que para la solicitud de una licencia de operación de una instalación radiactiva, en nuestro caso el servicio de medicina nuclear, el informe de Seguridad Radiológica debe contener la información referente a: especificaciones generales de la instalación; organización del solicitante; política de seguridad radiológica; programa de Garantía de Calidad; grupo de seguridad radiológica; fuentes de radiación; características de diseño en lo relativo a seguridad radiológica; estimación de los equivalentes de dosis; programa de seguridad radiológica; análisis de riesgos y plan de emergencia; impacto ambiental y cese de operaciones, desmantelamiento y cierre definitivo.

A continuación se enlistan las normas y organismos nacionales e internacionales en materia nuclear y de seguridad radiológica aplicables a los servicios de medicina nuclear en México.

- Secretaría del Trabajo y Previsión Social

NOM-012-STPS-2012. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes.

- Secretaría de Energía

NOM-008-NUCL-2011. Control de la contaminación radiactiva.

NOM-013-NUCL-2009. Requerimientos de seguridad radiológica para egresar a pacientes a quienes se les ha administrado material radiactivo.

NOM-026-NUCL-2011. Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.

NOM-027-NUCL-1996. Especificaciones para el diseño de instalaciones radiactivas Tipo II Clases A, B y C.

NOM-031-NUCL-2011. Requisitos para el entrenamiento del personal operacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.

Reglamentos

- Reglamento General de Seguridad Radiológica (RGSR).
- Reglamento de la Ley General de Salud en materia de prestación de servicios de atención médica.
- Reglamento de la Ley General de Salud en materia de Investigación para la Salud.

Organismos nacionales en materia nuclear

- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).

Organismos internacionales en materia de protección Radiológica

- Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés). En la actualidad, esta comisión constituye el organismo internacional que lidera la concepción filosófica y práctica de la Protección Radiológica.
- Comité Científico de la Naciones Unidas para el estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR por sus siglas en inglés). Este comité publica periódicamente reportes con información sobre las fuentes de radiación existentes en el mundo, los niveles de exposición de los seres humanos y los resultados de las investigaciones sobre los efectos de las radiaciones ionizantes en la salud.
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Pertenece a las organizaciones internacionales conexas al sistema de las Naciones Unidas, tiene como objetivo formular normas básicas de seguridad para la protección contra radiaciones, así como publica reglamentos y códigos de prácticas sobre determinados tipos de operaciones, incluido el transporte de material radiactivo; asimismo, fomenta el intercambio de información científica y técnica sobre la energía nuclear.
- Sociedad Mexicana de Medicina Nuclear. Esta entidad se suma a los esfuerzos de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) para desarrollar y garantizar el adiestramiento en protección radiológica de quienes trabajan en el campo de la medicina nuclear; así como de la realización de sus labores con el mayor profesionalismo y cuidado para los seres humanos y el medio ambiente, pues el uso de material radiactivo constituye la base de toda actividad realizada en este campo.

- Comisión Internacional de Unidades de Radiación (ICRU por sus siglas en inglés). Esta comisión y la ICRP han contribuido a definir las magnitudes y unidades que se emplean actualmente en Protección Radiológica.

3.2 Características de organización, funcionamiento y protección radiológica que deben cumplir los servicios de medicina nuclear de acuerdo a la legislación vigente.

El área de especialización que representa la medicina nuclear se distingue por emplear sustancias radiactivas o radiofármacos para examinar la función y estructura de los órganos a fin de diagnosticar y dar tratamiento oportuno, como en casos de cáncer (Oliva, 2003).

La generación de imágenes en esta especialidad integra una combinación de disciplinas, entre ellas la Química, la Física, la Matemática, la Tecnología Informática y la Medicina, de forma que sirvan al médico para diagnosticar diversas patologías, pues permiten conocer el funcionamiento de los diferentes sistemas y aparatos que conforman el cuerpo humano.

A fin de obtener las imágenes, las técnicas de diagnóstico se basan en los radiofármacos o trazadores, sustancias que, introducidas en el organismo, permiten conocer su funcionamiento fisiológico, pues el trazador se fija en un tejido, órgano o sistema determinados. Mediante la utilización de una gammacámara se obtienen imágenes morfológicas, funcionales y morfofuncionales. En los últimos años, gracias a la tomografía por emisión de positrones (PET), los estudios han pasado a ser moleculares (Veall et al, 1964). En la actualidad, existe una disponibilidad de cerca de 100 radiofármacos que permiten el diagnóstico y tratamiento precoz en patología ósea, cardiológica, oncológica y nefrológica, entre otras.

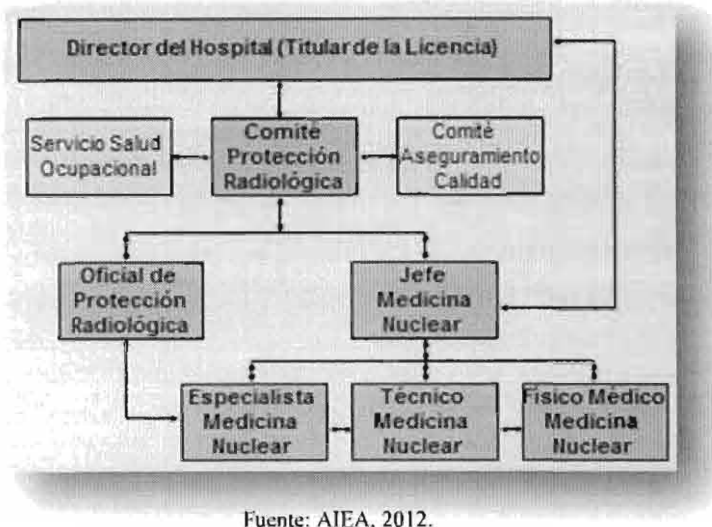
Desde el punto de vista terapéutico, la medicina nuclear tiene sus principales aplicaciones en el cáncer de tiroides, el hipertiroidismo y el tratamiento del dolor óseo. A diferencia de otras técnicas de diagnóstico que exigen cirugía, la medicina nuclear no es invasiva, pues, en la

mayoría de los casos, basta con una inyección endovenosa a través de la cual el trazador viaja a través de la sangre y se localiza en el órgano objetivo a estudiar. Asimismo, respecto a otros métodos de diagnóstico por imágenes, esta especialidad permite detectar anomalías difíciles o imposibles de percibir mediante otras técnicas, lo cual favorece el diagnóstico precoz, y, en consecuencia, la mayor rapidez en el tratamiento de la enfermedad (Gordon et al, 2009).

Ahora bien, de acuerdo al RGSR, la organización de toda instalación donde se use material radiactivo debe promover e incentivar la cultura de seguridad para fortalecer una actitud de aprendizaje y preocupación en materia de protección y seguridad radiológica, de manera que al enfrentar problemas particulares, estos sean rápidamente identificados y corregidos de acuerdo con su importancia. Asimismo, el reglamento destaca la relevancia de considerar las políticas y procedimientos establecidos como temas de la más alta prioridad; mismo caso de la identificación precisa de las responsabilidades de cada individuo, así como del óptimo entrenamiento y calificación de los trabajadores o POE, ámbito en el que las líneas jerárquicas forman parte esencial para la toma de decisiones, por lo que su definición debe ser clara y específica.

La Agencia Internacional de Energía Atómica recomienda la siguiente organización en el servicio de medicina nuclear, su elemento medular lo constituye el director del hospital o titular de la licencia, quien tiene como funciones generales: disponer del personal necesario y asegurar que este tenga el entrenamiento adecuado para desempeñar sus tareas; establecer un comité y programa de protección radiológica PPR, así como, un programa integral de aseguramiento de la calidad; proveer los recursos necesarios y asignar responsabilidades precisas al personal.

Figura 4. Organización en los servicios de medicina nuclear



Fuente: AIEA, 2012.

Asimismo, el organigrama debe contar con un encargado de seguridad radiológica, quien cumple las siguientes funciones: supervisar los aspectos operacionales del PPR; identificar deficiencias en el cumplimiento del PPR e informarlos al titular de la licencia y a la autoridad reguladora; cubrir necesidades de capacitación y organizar actividades de entrenamiento; verificar, de forma sistemática, que solo el personal debidamente autorizado realice las tareas cuya naturaleza exige de autorización previa; llevar a cabo la evaluación de seguridad radiológica de las instalaciones y equipos nuevos, antes de ser aceptados, así como de los procesos, entre otros.

La organización depende de un médico especialista en medicina nuclear, el cual debe asegurar la completa protección radiológica del paciente y la exposición mínima requerida para lograr su objetivo mediante la observación de los principios para exposiciones médicas; asimismo, prescribe y justifica por escrito el diagnóstico con consideración a información relevante de exámenes anteriores; establece, en consulta con el físico médico, protocolos optimizados para procedimientos de diagnóstico y terapia; evalúa todo incidente o accidente

radiológico desde el punto de vista médico; y proporciona los criterios para efectuar exámenes a mujeres embarazadas, pacientes pediátricos, procedimientos médico legales, exámenes de salud ocupacional e investigación médica y biomédica.

Por su parte, el conocimiento académico y técnico de un físico médico es vital en la instalación radiactiva, pues este participa en la revisión continúa de los recursos para las prácticas de medicina nuclear (que incluye presupuesto, equipos y personal), operaciones, políticas y procedimientos; también lleva a cabo las pruebas de aceptación de los equipos y supervisa el mantenimiento de los mismos; participa en la investigación y evaluación de incidentes y accidentes; así como contribuye con el programa de entrenamiento en protección radiológica.

Otro elemento fundamental en la organización es el técnico en medicina nuclear, quien se encarga de realizar la identificación del paciente; brindar información al paciente y sus familiares sobre el estudio a realizar, así como proporcionar indicaciones posteriores; verificar que el radiofármaco suministrado y su actividad pertenezcan al paciente adecuado; efectuar un control de calidad periódico del activímetro ; efectuar un monitoreo periódico del lugar de trabajo; manejar correctamente el equipamiento y los accesorios de seguridad; informar al médico nuclear en caso de errores de administración o de accidentes e incidentes.

Generalmente, un servicio de medicina nuclear consta de la siguiente infraestructura y distribución de áreas:

- a) Sala de preparación de radiofármacos (radiofarmacia) con instalaciones adecuadas y aptas para el almacenamiento de productos radioactivos.
- b) Sala de administración de radiofármacos a pacientes.
- c) Sala de exploraciones, donde se encuentra la gammacámara y el equipo necesario para la realización del estudio programado.

- d) Oficinas administrativas, área de reporte y cómputo, bodegas y, en caso de utilizar fuentes abiertas, recepción de material radiactivo.

Cuando también se llevan a cabo procedimientos terapéuticos, la infraestructura debe incluir habitaciones con depósito y se debe contar con un procedimiento de manejo de residuos radioactivos.

La organización interna del servicio de medicina nuclear debe contar con un grupo o comité de seguridad radiológica que tendrá bajo su dirección y vigilancia todo los aspectos relacionados con la protección radiológica del hospital. Este grupo depende directamente del titular de la licencia, permiso o autorización y debe estar apoyado por el director en todas las facetas correspondientes a la elaboración, ejecución, supervisión y modificación del Programa de Seguridad Radiológica. Las funciones del titular de este grupo, designado encargado de seguridad pueden ser desempeñadas por un médico nuclear, un físico médico o un profesional de la salud que, a criterio de la autoridad reguladora, reúna los requisitos para cubrir este puesto.

Respecto a los requisitos de protección radiológica durante la operación normal de una instalación de medicina nuclear, es fundamental considerar que ningún individuo debe ser expuesto a dosis de radiación superiores a los límites o restricciones establecidas por la autoridad reguladora, los cuales no aplican a la exposición de pacientes. En la práctica de este servicio, la protección y seguridad, tanto de los trabajadores, como del público, deben ser optimizadas a fin de que las dosis individuales, la cantidad de personas expuestas y la probabilidad de exposición potencial se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible.

3.3 Aspectos de seguridad e higiene que deben cumplir los servicios de medicina nuclear

Las condiciones de las instalaciones y la aplicación de procedimientos adecuados son indispensables en medicina nuclear para que el trabajo se lleve a cabo; por ello, cualquier deficiencia en dichos aspectos constituye un riesgo para la salud de los trabajadores.

Así, de acuerdo con la NOM-027-NUCL-1996, las instalaciones radiactivas, como en el caso de los servicios de medicina nuclear, deben cumplir con determinadas características de diseño. En primera instancia, deben construirse con materiales resistentes al fuego; así como su ubicación y estructura deben contar con características que minimicen los riesgos de inundaciones y derrumbes. Además, es imprescindible que posean: medios eficaces para prevenir la dispersión en el ambiente de contaminantes radiactivos en caso de accidente; sistema de iluminación adecuado para las actividades a desarrollar; conductos eléctricos y tuberías ocultos dentro de la zona controlada; ventilación capaz de asegurar que el aire no recircule ni se disperse hacia sitios donde no se maneja material radiactivo; así como un espacio especialmente diseñado para almacenar material radiactivo que no está en uso; así como puertas de acceso de fácil apertura interior y sin llave tanto para el almacén de material radiactivo, como para las zonas donde se aplica el mismo.

Asimismo, es menester que el servicio cuente con un área especialmente diseñada para el depósito de desechos radiactivos, como las torundas utilizadas en la canalización del paciente. También es importante que la distribución del área de aplicación de material radiactivo reduzca al mínimo la necesidad de transportar el material dentro del servicio.

Por otro lado, en los lugares destinados a la limpieza de material y utensilios de trabajo se debe contar con tarja con acabados lisos para el lavado; y llave del sistema de agua para el lavado de partes del cuerpo, así como regadera provista de un dispositivo que evite su contaminación para casos en los que esta ocurre por salpicaduras o derrames. A su vez, es necesario que el

sistema de drenaje posea una trampa accesible para realizar un monitoreo periódico con objeto de verificar el cumplimiento de lo establecido en la NOM-006-NUCL-1994; el sistema, además de poseer una señalización adecuada, debe estar distribuido de manera que reduzca la acumulación de sedimento radiactivo, con lo cual se minimiza el riesgo de contaminar otras instalaciones.

En cuanto al mobiliario de trabajo, este debe mantenerse en una cantidad mínima y hay que evitar muebles con cubiertas acojinadas donde se acumule el polvo; en caso de muebles metálicos, estos deben contar con acabados esmaltados, así como ser químicamente inertes, resistentes al fuego y fáciles de descontaminar.

Sumado a lo anterior, es indispensable que, a fin de valorar los niveles de radiación existentes en la instalación, el servicio de medicina nuclear cuente con un sistema de monitoreo ambiental distribuido en todo el lugar, preferentemente, en el cuarto de almacenamiento y en el área de utilización de material radiactivo. Otra consideración relevante consiste en la separación física de las áreas de almacenamiento temporal de los materiales radiactivos, las áreas de trabajo y las áreas de depósito temporal de los desechos radiactivos, las cuales deben contar con los blindajes adecuados para la protección radiológica del personal. La vigilancia periódica del manejo y almacenamiento de materiales y sustancias peligrosas también es fundamental, del mismo modo que la existencia de un sistema de seguridad física en toda la instalación con el fin de garantizar su resguardo.

Finalmente, en techos y paredes es necesario emplear para su mantenimiento pintura lavable y no porosa, además de sellar y redondear sus uniones (evitar esquinas, fracturas y superficies rugosas) para facilitar la descontaminación. El piso también debe ser de material liso, no poroso e impermeable. Estos tres componentes deben de contar con blindaje a fin de proteger a los trabajadores de las radiaciones emitidas por los procesos de trabajo.

Ahora bien, en lo referente a la vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes, la NOM-026-NUCL-2011 señala que el POE tiene el derecho a una protección y vigilancia médica eficaz en materia de seguridad radiológica y salud en el trabajo en función de los riesgos inherentes a la exposición ocupacional a la radiación.

En el caso particular de las radiaciones ionizantes, es indispensable conocer el estado inicial de salud del personal ocupacionalmente expuesto y comprobar periódicamente que no existen variaciones en su estado de salud atribuibles a dicha exposición.

La vigilancia médica del POE debe estar a cargo de un médico con conocimientos y experiencia en medicina del trabajo y en efectos biológicos de la radiación; quien, además, debe ser capaz de comprender los exámenes médicos previos a la contratación y los que se realizan periódicamente, los cuales se recomienda sean anuales, mas cuya frecuencia queda a juicio del médico encargado. Es necesario que el permisionario integre, para de cada uno de los individuos que conforman al POE, un expediente con la documentación establecida, el cual debe conservar durante los 30 años posteriores al término de la relación laboral.

La NOM-031-NUCL-1999 y la NOM-012-STPS-2012 establecen que el POE debe ser capacitado y entrenado para el cumplimiento de sus actividades, por lo que el personal que labore o pretenda laborar en instalaciones radiactivas y realizar actividades o prácticas reguladas por la CNSNS debe contar con escolaridad mínima de secundaria. A su vez, los cursos de entrenamiento inicial y periódicos para el encargado de seguridad radiológica, para el auxiliar del encargado de seguridad radiológica y para el POE deben contar con el reconocimiento de la Comisión antes de su impartición.

Tras su entrenamiento inicial, el encargado de seguridad radiológica y el auxiliar del encargado de seguridad radiológica clases A y B deben demostrar la aprobación de un curso avanzado de protección radiológica con una duración mínima de 144 horas, de las cuales 104

horas corresponden a teoría y 40 horas, a práctica. El egresado de este curso debe ser capaz de identificar y resolver satisfactoriamente los requisitos de protección radiológica en el diseño, la construcción, operación, modificación, cese de operaciones, desmantelamiento y cierre definitivo de una instalación radiactiva tipo I-A, I-B, II-A o II-B.

En relación al entrenamiento periódico, el encargado de seguridad radiológica debe aprobar un curso de actualización cada cinco años, con una duración mínima de 40 horas; así como debe ser capaz de identificar y resolver satisfactoriamente los requisitos de protección radiológica mediante la consideración de: los cambios desarrollados en la normativa aplicable; los cambios efectuados en su instalación; las actualizaciones en el manual de seguridad radiológica; el plan de emergencia y los avances tecnológicos.

Por su parte, el entrenamiento del POE incluye la aprobación del curso sobre protección radiológica, con una duración mínima de 40 horas, 24 dedicadas a la teoría y 16, a la práctica; también debe aprobar un curso adicional de entrenamiento en el manual de seguridad radiológica y en el plan de emergencia específico del servicio de medicina nuclear, cuya duración y contenido se establecen de acuerdo con el nivel de riesgo del lugar. Este curso debe ser impartido por el encargado de seguridad radiológica y el egresado del mismo debe ser capaz de demostrar el conocimiento de los conceptos de: actividad, radiación ionizante y su interacción con la materia; principios de detección de la radiación; efectos biológicos; diferencia entre exposición a la radiación y contaminación; rutas de incorporación del material radiactivo en el ser humano; diferencia entre dosis absorbida y equivalente de dosis; sistema para limitación de dosis; factores de protección radiológica (tiempo, distancia y blindaje); principio ALARA; límites de dosis reglamentarios; niveles de referencia; y reglamentación aplicable en protección radiológica.

Por otro lado, el egresado del curso de entrenamiento en el manual de seguridad radiológica y en el plan de emergencia debe ser capaz de demostrar conocimientos sobre: la

instalación y aplicación correcta de los procedimientos contenidos en dichos manuales y para el manejo de los detectores de radiación ionizante; el uso y manejo de los dosímetros y alarmas sonoras; la conducta en zonas controladas o restringidas; la limitación de dosis; la respuesta a emergencias; el uso de ropa y equipo de protección; el monitoreo radiológico personal y de áreas de trabajo; la detección oportuna de situaciones anormales de operación; la respuesta inmediata a incidentes y accidentes, así como su notificación correspondiente a los responsables de la instalación; la reducción de la generación de desechos radiactivos; la detección de contaminación de personal y de áreas de trabajo; y el monitoreo de descargas al drenaje y emisiones al ambiente.

Ahora bien, la NOM-012-STPS-2012 recomienda efectuar el reconocimiento, evaluación y control del servicio de medicina nuclear al menos cada doce meses; se sugiere realizar estas fases de supervisión antes de dicho lapso cuando existe modificación de los procesos, sustitución de materiales radiactivos o desperfectos en los equipos.

La fase de reconocimiento consiste en la identificación de las diferentes condiciones que puedan causar algún accidente u otro tipo de riesgo. Con base en el análisis de riesgos, se debe recabar toda aquella información técnica y administrativa que permita seleccionar el método de evaluación en condiciones normales de operación. Así, es imprescindible que el reconocimiento contenga al menos información sobre: identificación del POE; rotación y reubicación de trabajadores por áreas y turnos cuando aplique; fuentes de radiación ionizante empleadas en el proceso; características físicas y químicas de las fuentes de radiación ionizante; inventario del equipo de medición de radiación ionizante; y estado y tipo de los sistemas de control de las fuentes de radiación ionizante o equipos que las contengan, así como de otros dispositivos de protección física y radiológica.

Con base en los resultados obtenidos en el reconocimiento, se define el tipo de evaluación a realizar para determinar la magnitud de la dosis recibida por el POE o la contaminación en

áreas de trabajo, mobiliario, equipo y materiales. Es importante mencionar que los límites de equivalente de dosis anual no contemplan las dosis recibidas por exposición natural ni por diagnóstico o tratamiento médico.

Finalmente, a partir de los resultados de la evaluación, se debe vigilar que no se rebasen los límites de incorporación de material radiactivo al trabajador, según lo establecido en la NOM-005-NUCL-1994, ni los límites de equivalente de dosis para POE o para público, los cuales se hallan establecidos en el Reglamento General de Seguridad Radiológica. Asimismo, deberá asegurarse que los valores de contaminación radiactiva no rebasen los límites establecidos en la NOM-008-NUCL-2011 para contaminación en las áreas de trabajo, mobiliario, equipo y materiales.

En cuanto a los desechos radiactivos generados, estos deben separarse conforme al proceso de tratamiento al que serán sometidos; es importante considerar que las áreas de trabajo donde se aplica material radiactivo deben poseer contenedores para la recolección de desechos, marcados e identificados de acuerdo con lo establecido en la NOM-026-STPS-2008, donde también se señala que los contenedores para desechos sólidos requieren un sistema para abrirse mediante el pie, mientras que los utilizados para líquidos deben contar con tapa rosca.

En las zonas controladas queda estrictamente prohibido el consumo de alimentos, bebidas y tabaco; así como el uso de cosméticos, sustancias de aplicación cutánea y pañuelos textiles.

De acuerdo con las especificaciones de la NOM-012-STPS-2012, toda instalación radiactiva y, por tanto, los servicios de medicina nuclear, deben contar con un programa de seguridad e higiene que contenga la siguiente información:

- descripción de los antecedentes del centro de trabajo en el uso, manejo, almacenamiento y transporte de fuentes de radiaciones ionizantes;

- descripción de los procesos del centro de trabajo que impliquen el uso de fuentes de radiaciones ionizantes;
- políticas, objetivos y metas de seguridad e higiene relacionadas a radiaciones ionizantes;
- sistema de comunicación y coordinación entre las diferentes áreas involucradas;
- descripción de los recursos administrativos y técnicos para el cumplimiento del programa específico de seguridad e higiene;
- procedimientos para la investigación de accidentes;
- descripción de las actividades, métodos, técnicas y condiciones de seguridad e higiene relativas a radiaciones ionizantes; procedimiento para su verificación y, en su caso, los manuales de procedimientos específicos.

3.4 Situación actual de la práctica de medicina nuclear en el cumplimiento de la normatividad

El sector salud emplea a más de 20 millones de trabajadores en Latinoamérica y Estados Unidos, lo cual supone un gran peso social y económico al representar el 5% de la población económicamente activa y un 7% promedio del PIB.

El sistema mexicano de salud comprende dos sectores: el público y el privado. Dentro del sector público se encuentran las instituciones de seguridad social como el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) que atiende a la población trabajadora que labora en las empresas del sector privado; el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) al que se encuentran adscritos los empleados de dependencias gubernamentales;

Petróleos Mexicanos (PEMEX); la Secretaría de la Defensa (SEDENA); y la Secretaría de Marina (SEMAR).

Asimismo, existen instituciones y programas para brindar atención a la población sin seguridad social: Secretaría de Salud (SSA); Servicios Estatales de Salud (SESA); programa IMSS-Oportunidades (IMSS-O); y Seguro Popular de Salud (SPS) (Noriega et al, 2008).

Por su parte, el sector privado comprende a las compañías aseguradoras y los prestadores de servicios que trabajan en consultorios, clínicas y hospitales privados, se incluye a los prestadores de servicios de medicina alternativa.

En el caso de la medicina nuclear, su implantación en el mundo se halla en relación directa con el desarrollo económico de cada país. Así, EE.UU. y Japón son los países que cuentan con más servicios de esta índole, seguidos por Europa, Latinoamérica, Asia y África.

Actualmente, en México existen diversas instituciones con unidades de medicina nuclear, el 60% son de carácter público y el 40% pertenece a la iniciativa privada; así como existen 40 centros PET (IMSS, 2011). Anualmente, se realizan más de 830,000 exploraciones y tratamientos (90% públicos y 10% privados). De acuerdo con estadísticas de la CNSNS, los servicios de medicina nuclear han cobrado auge en los últimos años y la cantidad de estudios va en aumento.

En nuestro país, la demanda nacional de radioisótopos como fuentes abiertas se distribuye de la siguiente forma: sector salud (89%), industria (9%) y el campo de la investigación (2%). La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias reporta que en México existen 1,900 licencias de uso y posesión de material radiactivo, cifra que, en los últimos cinco años, ha tenido un incremento del 5% (Vizuet et al, 2009).

En el área específica de la medicina, la demanda nacional de radioisótopos distribuidos a hospitales públicos y privados para el periodo 2000-2008 muestra un crecimiento constante que,

en los últimos tres años, se aproxima al 3.3% anual. Durante los últimos 10 años, la aplicación de técnicas nucleares en el sector salud, a nivel nacional, ha dado como resultado el incremento del diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como ha reducido el periodo de estancias hospitalarias y la dosis de medicamentos; y ha aumentado la generación de nuevos conocimientos acerca de los procesos metabólicos derivados del empleo de radiofármacos en algunas enfermedades. El área de la salud en México reporta los beneficios más importantes del uso de material radiactivo con un pronóstico, a corto y mediano plazo, del incremento en la demanda de los métodos nucleares.

México cuenta con una experiencia de 40 años en la aplicación de técnicas nucleares no energéticas. En 1956, el Gobierno Federal creó la Comisión Nacional de Energía Nuclear, con una inversión importante para infraestructura y equipamiento, a fin de formar recursos humanos especializados e integrar grupos interdisciplinarios para realizar investigación básica y aplicada, así como brindar una mayor difusión sobre el tema de los usos pacíficos de la energía nuclear. A partir de ese momento, las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear han tenido un crecimiento sostenido.

Actualmente, México cuenta con la siguiente infraestructura para aplicación de técnicas nucleares en el sector salud (IMSS, 2011):

- 103 gammacámaras.
- 26 gammacámaras para diagnóstico en medicina nuclear (sistemas SPECT, SPECT-PET y SPECT-CT).
- 8 sistemas para tomografía computarizada por emisión de positrón.
- 78 aceleradores: 66 para uso médico, 3 para uso industrial, 3 baby ciclotrones y 6 para investigación.

- 64 unidades para cobaltoterapia.
- 18 sistemas *Gamma Knife* para cobaltoterapia.
- 24 sistemas automáticos para braquiterapia con iridio-192 con alta tasa de dosis.

Asimismo, en la actualidad es posible encontrar centros de medicina nuclear en los principales hospitales públicos y privados del país, entre los que se destacan las unidades del Hospital General de México, el Hospital Juárez de México, el Hospital Infantil, los Institutos Nacionales de Investigación, en particular: Nutrición, Cardiología, Cancerología y Pediatría; así como los hospitales del ISSSTE: 20 de Noviembre, Adolfo López Mateos y 1º de Octubre y privados también de la capital mexicana y algunos de los estados de la República.

De acuerdo con estadísticas de la UNAM, de cada generación del área de Medicina Nuclear egresan tres especialistas, que suman un total de 250 en nuestro país (CIFRHS, 2012).

Por otro lado, es importante comentar las características del servicio de medicina nuclear de un centro hospitalario, asimismo se hace relevante la definición de esta especialidad médica y se define como la rama de la medicina que emplea los isótopos radioactivos y las radiaciones ionizantes para fines de prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médica (Gil, 2001).

3.5 Manual de procedimientos de protección radiológica y protección civil

En cumplimiento con lo estipulado en los Artículos 2 y 4 del Reglamento General de Seguridad Radiológica, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias emite recomendaciones cuyo propósito consiste en indicar el contenido del Manual de Procedimientos de Seguridad Radiológica, mismo que debe presentar el solicitante de autorización, permiso y licencia para:

- a) Uso y posesión de material radiactivo; adquisición, almacenamiento temporal o definitivo.
- b) Procesamiento, acondicionamiento, vertimiento y disposición de desechos radiactivos de nivel bajo e intermedio.
- c) Construcción, operación, modificación, cese de operaciones, desmantelamiento y cierre definitivo de instalaciones radiactivas.

El Manual de Procedimientos de Seguridad Radiológica tiene el objetivo de que toda acción que involucre fuentes de radiación ionizante se ejecute bajo normas y procedimientos adecuados a fin de reducir las exposiciones, tanto ocupacionales como del público, a valores tan bajos como sea razonablemente posible. Asimismo, sirve para proporcionar al POE un conjunto de procedimientos para cada una de las actividades rutinarias realizadas con material radiactivo y para afrontar situaciones de emergencia, incidentes y accidentes, todo ello presentado con un lenguaje claro y accesible. Sumado a lo anterior, el manual también indica las obligaciones que adquiere el POE en el desempeño de sus labores en las instalaciones radiactivas.

Así, el contenido del manual debe incluir, en función del uso del material radiactivo, actividades particulares y con las características particulares del servicio de medicina nuclear. Adicionalmente, es necesario que incluya procedimientos administrativos con impacto en la seguridad de la instalación, como: control de acceso a las zonas donde se utilizan fuentes de radiación ionizante; establecimiento y mantenimiento de los registros de dosimetría; y bitácoras de vigilancias radiológicas, por mencionar algunos. Los procedimientos que forman parte del manual no deben contener información inaplicable, en específico, a las actividades del servicio de medicina nuclear.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente, es necesario que el manual sea elaborado por el grupo o el titular encargados de seguridad radiológica y este debe ser aprobado por el permisionario. Su contenido posee carácter general para cualquier tipo de solicitud con el objetivo de servir de lineamiento a fin de que, a partir del mismo, el solicitante desarrolle los procedimientos que lo integran. Por cada uso del material radiactivo deberán presentar en forma específica los siguientes procedimientos:

- De operación. Tiene por objeto brindar seguridad en la realización de toda actividad en la que se emplee material radiactivo, para lo cual es menester indicar de forma secuencial los pasos a seguir. Los procedimientos de operación del servicio de medicina nuclear deben incluir los siguientes tópicos: recepción de las fuentes de radiación ionizante (unidosis); uso del equipo o dispositivo que contiene la fuente de radiación ionizante, cambio o reemplazo de las fuentes de radiación; verificación de los sistemas de seguridad incorporados al equipo o dispositivo que contiene la fuente de radiación ionizante; dosimetría personal externa o interna; calibración o verificación de los equipos detectores de radiación ionizante; levantamiento de niveles de radiación.
- Administrativos. Corresponden a los procedimientos que el permisionario debe instaurar para mantener el nivel adecuado de seguridad radiológica durante el desarrollo de las actividades del servicio de medicina nuclear. Estos son: elaboración, revisión y aprobación de procedimientos; determinación de zonas (controladas, no controladas, restringidas) y de límites y niveles de referencia; así como inspecciones y auditorías internas, lo cual supone la realización de los registros y formatos correspondientes. Entre estos últimos se encuentran: dosimetría personal; calibraciones y/o verificaciones del equipo detector y equipos utilizados en el servicio; inventario y control de Unidosis;

exámenes médicos del personal ocupacionalmente expuesto; vertimiento de desechos radiactivos generados (biológicos); y entrenamiento del personal en materia de seguridad radiológica.

- De emergencia. Esta sección del manual debe presentar los procedimientos para responder a un incidente o accidente en el que se hallen involucradas las fuentes de radiación ionizante; por ello, es necesario desarrollar procedimientos correspondientes a cada uno de los posibles incidentes o accidentes postulados en el Informe de Seguridad y Análisis de Riesgos presentados a la CNSNS. En este sentido y términos generales, en el servicio de medicina nuclear, se deben considerar los procedimientos para: activar el plan de emergencia; notificar la ocurrencia de un incidente o accidente al grupo de seguridad radiológica, al encargado de seguridad radiológica y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias; y reportar el incidente o accidente.

A continuación se presentan los requerimientos generales que debe contener el plan de protección civil, que debe de incluir los procedimientos generados como consecuencia del uso de radiaciones ionizantes para el servicio de medicina nuclear, por ejemplo, en casos de incendio, sismo, inundación u otra eventualidad que aumente el riesgo de accidente radiológico. Es fundamental que para cada situación particular se establezcan los pasos a seguir, el personal responsable y la disponibilidad del equipo de emergencia.

- Procedimiento para la exposición accidental a radiaciones. Establece las medidas a seguir en caso de exposición o sospecha de exposición accidental a radiaciones ionizantes no relacionada con la exposición propia del POE. En este caso, el permisionario es responsable de facilitar al personal todo lo necesario para cumplir con el procedimiento y el total del POE está obligado a cumplir estrictamente con la política de seguridad

radiológica estipulada en el Reglamento General de Seguridad Radiológica a fin de evitar este tipo de accidentes.

- Procedimiento para la emergencia por incendio. Indica las acciones a ejecutar en caso del incendio de algún equipo durante la realización de un estudio. Todo el personal deberá conocer las rutas de evacuación de la instalación y sus zonas de seguridad; el permisionario será responsable de facilitar al personal el equipo necesario para hacer frente a la emergencia. Este procedimiento debe contener, además, la recomendación de realizar al menos una vez al año un simulacro de desalojo del servicio de medicina nuclear con todo el personal de las instalaciones; asimismo, debe señalar que el POE del área está obligado a conocer el funcionamiento y localización de los extintores con que cuenta la instalación. En consideración a este tipo de eventualidades, es de suma relevancia que los números de emergencia de la Coordinación Interna de Protección Civil sean colocados en un lugar visible.
- Procedimiento para la emergencia por inundación. Indica las acciones correspondientes en caso de que se produzca una inundación en alguna de las áreas del servicio de medicina nuclear durante la realización de estudios a pacientes.
- Procedimiento para la emergencia por sismo. Establece las acciones a implementar en casos de sismos que afecten al servicio de medicina nuclear.

Capítulo 4. El proceso de trabajo de la medicina nuclear

El objetivo de este capítulo consiste en conocer el proceso de trabajo en el servicio de medicina nuclear, así como los principales riesgos, exigencias y daños a la salud derivados del mismo. Por ello, en la primera sección, precisamente, se aborda, de manera general, el proceso de trabajo.

Los riesgos y exigencias generadas en dicha especialidad, y de acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo, se exponen en el segundo apartado, mientras que en el tercero, se presentan algunos estudios realizados sobre los daños generados a trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes, así como se plantea un breve debate acerca del pobre interés que en esta área manifiesta el binomio salud y trabajo.

Para fines de la investigación, el proceso general de trabajo de los servicios de medicina nuclear incluye las siguientes fases: administración de recursos, consiste en la solicitud del material radiactivo pertinente para cada paciente con su registro respectivo; preparación de radiofármacos, consta del acondicionamiento del material para su aplicación; suministro de radiofármaco, es la etapa de aplicación al paciente según el estudio a realizar; desechos del material radiactivo, como su nombre lo indica, corresponde al almacenamiento seguro de los residuos para su eliminación de las instalaciones; y, finalmente, archivo, en el cual se registran las actividades diarias y se mantienen, a la vista del POE, los programas internos de protección y seguridad radiológica.

A continuación, se describen dichas fases con mayor detalle:

Administración de recursos. El médico nuclear autoriza el pedido mensual de insumos, radioisótopos y productos liofilizados utilizados en el servicio; asimismo, se encarga del control de los mismos en relación a: fechas de expiración, cantidad, tipo, volumen, equipamiento del material radiactivo, así como de sus respectivos reportes.

Preparación de radiofármacos. El técnico radiólogo, con apego a las normas de seguridad radiológica y de asepsia, emplea guantes y materiales desechables para eluir el generador radiactivo que se empleará en la cámara blindada específica para este proceso; registra el volumen, la actividad, fecha y hora de la elución en las tablas de generación y material radiactivo; evalúa el rendimiento de la elución, así como detecta y registra las no conformidades de procedimiento; prepara los cálculos volumétricos y de decaimiento radiactivo, de acuerdo con las especificaciones del fabricante del producto; y, finalmente, realiza la medición de la dosis correspondiente, en función del estudio a realizar, para la administración al paciente.

Suministro de radiofármacos. El médico o el técnico radiólogo verifica la dosis correcta según el tipo de paciente (condición, edad, peso corporal) y del estudio solicitado por el médico tratante; rotula la dosis preparada con el nombre del radiofármaco, dosis, fecha y hora de preparación; fracciona y administra la dosis en volumen adecuado mediante el empleo del material apropiado según la vía y forma de administración. La dosis de radiofármaco se suministra al paciente con un contenedor blindado y, por último, se procede a la realización del estudio específico (gammagrafía, PET, SPECT).

Desecho de residuos radiactivos. Posterior al suministro de radiofármacos, el técnico radiólogo almacena los desechos radiactivos en recipientes identificados con rótulos y leyendas de material radiactivo, donde permanecerán hasta su decaimiento en condiciones seguras; verifica las fechas de eliminación de acuerdo a las normas vigentes en esta materia; y desecha el material decaído según las normas de bioseguridad y radioprotección del lugar de trabajo.

Archivo. Mantener la documentación requerida actualizada y visible para el POE.

En los servicios de medicina nuclear, los pacientes son atendidos directamente por médicos, personal de enfermería y tecnólogos o técnicos que operan los equipos. Sin embargo, para trabajar correctamente, el servicio requiere de otros profesionales que tienen un papel muy importante, por ejemplo, el físico médico juega un rol fundamental, pues, como señalamos en el apartado anterior, es el encargado de mantener una vigilancia permanente sobre seguridad radiológica.

4.1 Riesgos y exigencias en medicina nuclear

Ya se ha hecho hincapié en que la manipulación y uso de fuentes de radiación requieren del diseño y la construcción de instalaciones especiales cuyas características, por un lado, impiden la exposición de los trabajadores a riesgos, y, por el otro, proporcionan la seguridad de una exposición radiológica mínima, externa o interna. Asimismo, el acceso a todas las zonas donde existe probabilidad de exposición a fuentes de radiación o a materiales radiactivos, debe ser restringida únicamente a los trabajadores del área, quienes tienen la obligación de portar la ropa o equipo protector indicado y adoptar las precauciones específicas de estas áreas (Gestal, 2001).

Ahora bien, en lo referido a las exigencias, estas son relevantes para mantener la integridad de la salud del POE, pues si bien el desarrollo de las labores de la medicina nuclear, como otras especialidades médicas, dependen del factor impredecible de la salud para satisfacer las necesidades de un diagnóstico oportuno de la población solicitante, también la duración de la jornada de trabajo constituye un factor fundamental en esta área dada su dependencia de la demanda de estudios de diagnóstico y tratamiento.

La falta de organización en la programación previa de los estudios complica la posibilidad de fijar el ritmo de trabajo. El personal de medicina nuclear no tiene injerencia en la decisión sobre los tiempos para realizar los procedimientos y el hecho que estos se encuentren evaluados

bajo un riguroso control de calidad, supone para el trabajador la tensión de una supervisión estricta.

Por su parte, los riesgos derivados del trabajo con material radiactivo no dependen únicamente del nivel de radiotoxicidad o de toxicidad química y de la actividad de los radionucleídos, sino también de la forma física y química del material radiactivo, así como de la naturaleza y complejidad de la operación o de los procedimientos que se realizan (Cherry, 2001).

Resulta claro que la presencia de radiaciones de tipo ionizante en el lugar de trabajo es la principal causa de los riesgos derivados de la utilización de los medios de trabajo, es decir, del empleo de los instrumentos de trabajo que modifican las características del medio ambiente; así como de aquellos riesgos que se derivan de la transformación de los objetos de trabajo.

En medicina nuclear, el uso de radioisótopos es fundamental para la realización de los procedimientos, no emplear campanas o cajas con guantes para manipular fuentes no selladas de material radiactivo y un sistema de ventilación que no facilita la circulación en una dirección específica para que se elimine el material radiactivo suspendido en el aire, son precursores de daños a la salud de los trabajadores. Asimismo, el contacto con las radiaciones que emiten los isótopos radiactivos puede provocar que estas ingresen al organismo tanto a través de la piel, como por vía respiratoria y aparato digestivo.

Cabe destacar que, en medicina nuclear, parte del procedimiento para realizar un estudio consiste en colocar los colimadores en el escáner de tomografía, lo cual representa el mismo esfuerzo que levantar objetos desde el nivel del piso; además, el personal permanece sentado la mayor parte de su jornada laboral.

4.2 Daños a la salud en medicina nuclear

La indiferencia por la salud y la seguridad de los trabajadores ha sido una característica manifiesta en las sociedades antiguas y contemporáneas. A comienzos de la década de los años 40, con el estallido de la Segunda Guerra Mundial, se comprendió la importancia de la salud laboral; el conflicto bélico evidenció la relevancia del estado de salud de la población trabajadora para cumplir con las demandas generadas.

A este respecto, Betancourt (2005) señala:

“A pesar de que hace más de un siglo ha existido alguna expresión de vigilancia epidemiológica, ha sido vinculada a enfermedades infectocontagiosas. Una de sus últimas aplicaciones y bajo el referente de la epidemiología convencional ha sido en el campo de la salud de los trabajadores (p.93). Como hemos visto a lo largo de este documento, el seguimiento riguroso de la aplicación de la normatividad es primordial, pero la incorporación de estudios epidemiológicos periódicos permite el desarrollo óptimo del medio ambiente laboral en el servicio de medicina nuclear”.

El trabajo, es parte fundamental de la creación, evolución y desarrollo de las sociedades, lo cual conlleva la preocupación de la salud laboral. La importancia de la salud en la población económicamente activa no debe ser subestimada, pues esta constituye la tercera parte de la población mundial y es responsable de trabajar para generar el sustento de la comunidad, para lo cual suministra los bienes y servicios necesarios; así como constituye la fuerza creadora y promotora de diversas formas de progreso de la sociedad.

En México, el pobre compromiso ambiental y laboral del sector salud ha sido motivo de controversia, en especial en el área hospitalaria, en la cual la falta de asesoría y vigilancia se traduce en acciones alejadas de la normatividad vigente que sobre estas materias existe en el país.

La rama industrial manufacturera y de servicios han merecido atención particular por su impacto ambiental, entre ellas se encuentran la química, la siderúrgica y los servicios hospitalarios.

En este sentido, la aplicación de modelos de evaluación ha alcanzado gran interés en diferentes ramas de la industria. En EE.UU., en los años 80, surgió el programa pionero de vigilancia epidemiológica: el Sistema de Notificación de Eventos Centinela para Riesgos Ocupacionales (SENSOR por sus siglas en inglés), con el fin de registrar los problemas específicos de salud de los trabajadores (enfermedades y lesiones) y reportarlos a las instituciones de salud con la finalidad de su control y prevención. Sin embargo, este sistema no toma en cuenta las leyes vigentes ni los determinantes del proceso salud-enfermedad, por lo que los resultados no fueron los esperados por los trabajadores.

La relación salud-trabajo ha sido observada y estudiada en términos unicastales, individuales y biológicos, de manera que su control se enfoca únicamente desde las perspectivas del control médico de las enfermedades y del reclutamiento del personal. Sin embargo, la investigación científica y la intervención en el ámbito de la salud de los trabajadores requieren estar orientadas en dos direcciones fundamentales: los aspectos preventivos y el desarrollo de bases metodológicas e instrumentales científicamente establecidas.

De lo anterior y dada la carencia de información sobre evaluaciones en materia de salud laboral en establecimientos donde se manejan radiaciones ionizantes, surge el interés de su estudio en el sector salud.

Algunas investigaciones, enfocadas en servicios de radiodiagnóstico, han evaluado los efectos de la exposición a las radiaciones ionizantes en POE y constituyen la base para argumentar la insuficiencia y carencia de información sobre evaluaciones en materia de salud laboral en servicios de medicina nuclear, tanto en el ámbito nacional, como en el internacional.

Por ejemplo, Ching-Ming (2004) realizó una investigación durante un año sobre los potenciales efectos de la exposición a radiaciones ionizantes en el Hospital General del norte de Taiwán, en la cual se tomó una muestra de cinco departamentos: radiología, medicina nuclear, radioterapia, cirugía y odontología. De los 5,300 empleados, 153 fueron identificados como ocupacionalmente expuestos a radiaciones ionizantes. Los empleados seleccionados fueron divididos en tres categorías según la definición de Energía Atómica en Taiwán:

- Grupo 1. Radio operadores. Manejo de rayos X y Tomografía Axial Computarizada (TAC); se incluyó todo el personal del área de radiología.
- Grupo 2. Manejo de radioisótopos; área de medicina nuclear.
- Grupo 3. Manejo de rayos gamma, cobalto-60, entre otros; área de radioterapia.

A cada participante se le proporcionó un dosímetro Termoluminiscentes de Harshaw (TLD) para portar sobre la ropa con su equipo de protección personal y se le capacitó en su uso con el fin de vigilar la radiación a partir de enero y hasta diciembre de 2004; posteriormente, se les realizó un examen médico general con marcadores tumorales. Cada uno de los dosímetros personales fue sensible a rayos-X, radiación térmica de neutrones y exposición externa emitida por isótopos.

Los resultados arrojados fueron los siguientes: los participantes fueron expuestos a un rango de dosis acumulada anual de 0.7 a 49 mSv, cuya media se encuentra entre 6 y 10 mSv, por lo que los niveles de dosis más alta fueron para el grupo de radio operadores con exposición de 50 mSv anual.

Por su parte, en Polonia se realizó una evaluación de la exposición ocupacional a la radiación ionizante —rayos gamma y X— (Jerzy et al, 2006) que consideró una muestra de 3,161 trabajadores empleados en 3,635 instituciones de salud en el país para medir la dosis del cuerpo

completo por medio de dosímetros personales; por otro lado, para las mediciones de dosis de pies y manos la población estudiada fue de 805 trabajadores de 62 instituciones con mayor nivel de exposición, en este caso se empleó un dosímetro termoluminiscente de acuerdo con el AB327, procedimiento polaco de acreditación nuclear.

Los resultados obtenidos colocan la media de exposición a radiación en 0.49 mSv para cuerpo entero, y en 7.5 mSv para manos y pies, por lo cual se concluyó que la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes se mantuvo al mismo nivel y la protección radiológica en el sector salud fue satisfactoria.

Otro estudio es el de Gambini (2006), en el cual se analizó el nivel anual de exposición global, externa e interna, a las radiaciones ionizantes de los empleados del Centro de Asistencia Pública sanitaria de París, Francia. El estudio evaluó a 6,618 médicos ocupacionalmente expuestos, con el empleo de 43,680 dosímetros pasivos para evaluar la exposición externa durante los 12 meses; durante los primeros tres se utilizaron de categoría A y categoría de anillo B, estos últimos para medir la dosis de los dedos de trabajadores del área de medicina nuclear y radiología intervencionista. Por su parte, la exposición interna se determinó a partir de mediciones radiométricas y radioquímicas.

Los resultados fueron los siguientes: el promedio anual de dosis efectiva externa fue baja (0.032mSv) y no se observó contaminación interna. La dosis total del cuerpo y las dosis de la piel nunca excedieron el límite de dosis. El dosímetro de anillo B dio una mejor evaluación de la dosis de los dedos, cuyas dosis altas se observaron en radioterapia (0.038 mSv) y en medicina nuclear (0.66mSv). Estos datos sirvieron para concluir que la exposición ocupacional de los trabajadores de la salud se encontraba dentro de límites normales, pues el límite total para el cuerpo es de 20mSv; asimismo, confirmaron que las medidas en protección radiológica

representan una fuente de optimización para evitar los efectos estocásticos de la radiación ionizante.

La epidemiología experimental ha evidenciado que la exposición de la población a dosis altas de radiaciones ionizantes produce cáncer, caso de sobrevivientes de bombas nucleares, así como pacientes y personal de los servicios de radioterapia. Por ello, en Lituania, Povilas, Atkocius y Samerdokiené (2008) realizaron una investigación cuyo principal objetivo consistió en determinar el estado de la exposición ocupacional de los trabajadores en dicho país, para lo cual se analizó minuciosamente, de 1991 a 2003, una muestra de 1,331 trabajadores de la salud expuestos a radiación distribuidos en tres categorías profesionales (radiología, radioterapia y medicina nuclear), cada uno recibió un dosímetro individual con número personal para ser colocado en la región antero izquierda del tórax, fuera del delantal de blindaje.

El dosímetro de termoluminiscencia se utilizó para mediciones de dosis en las extremidades y para exposición externa, cuya dosis límite fue de un promedio de 0.02 mSv anual durante un periodo de cinco años.

A su vez, se encontró que el promedio total de dosis anual por exposición de trabajo se redujo para el personal de radiología y radioterapia de 1.90 a 1.13 mSv, y para el de medicina nuclear de 1.64 a 1.35mSv; los radiólogos de diagnóstico y técnicos presentaron la exposición más alta. Cabe señalar que el análisis incluyó todas las dosis recibidas y la distribución anual de los registros de dosis personal mostró que el 97.4% de los registros de dosis recibidas se encontraron por debajo de 5mSv.

Por su parte, Hyum-Sul (2010), miembro de la Asociación Médica de Corea, realizó un estudio, centrado en radiaciones ionizantes, sobre los problemas de salud provocados por factores físicos entre los trabajadores de la salud. El investigador señala que este tipo de personal se enfrenta a muchos peligros físicos en los hospitales, en especial, las radiaciones ionizantes.

Para esta investigación, se tomó como muestra a 18 trabajadores del área de radiología y medicina nuclear del Hospital Central de Corea a fin de monitorizar la dosis de radiación acumulada durante un periodo de dos años. Los participantes fueron seleccionados de ambos sexos, de entre 30 y 35 años, sin antecedentes de radiodiagnóstico previo y sin hábito de fumar; se les dotó de un dosímetro personal supervisado según las leyes vigentes ese país.

Los resultados mostraron que la dosis de exposición se encontraba dentro de los límites normales y que los trabajadores estaban capacitados en el tema de protección radiológica.

Una evaluación llevada a cabo en España abarca otro ámbito importante de la medicina nuclear, en este caso se analizó la dosis de radiación del personal de una planta de radiofármacos (Sánchez et al, 2010) con el objetivo principal de conocer el perfil sociodemográfico de los trabajadores sobre la base de variables como género, edad y tareas realizadas; asimismo, se evaluó la dosis anual colectiva de los trabajadores con riesgo potencial de ionización por exposición a la radiación en el lugar de trabajo, con un periodo de seguimiento de cuatro años.

Esta investigación utilizó una muestra de 23 trabajadores e información secundaria sobre su distribución. El programa de monitoreo individual se realizó mediante dosímetro individuales, dominios de primer nivel y vigilancia de la contaminación interna (método in vivo).

Los resultados sobre la dosis encontrada en el periodo estudiado sugieren que la exposición externa y las áreas de distribución fueron la fuente principal de exposición ocupacional durante la producción de radioisótopos; la exposición interna no fue incluida en la dosis estimada, pues era tan pequeña que no tenía valor para fines de la investigación. La edad con más riesgos se determinó entre los 25 y 35 años (edad productiva), con el sexo masculino como el más afectado en tanto este representa el 70% de la plantilla que labora en las áreas de producción y distribución de radiofármacos, que son las más contaminadas.

Este estudio tiene un carácter exploratorio importante al analizar las posibles correlaciones de las radiaciones ionizantes con los efectos adversos en la salud a fin de proporcionar directrices para la investigación epidemiológica ocupacional.

Por otro lado, un artículo referido a la vigilancia de la exposición a radiaciones ionizantes en el personal de salud (Tomasina et al, 2010), publicado en Uruguay, refiere que el programa de vigilancia en el ambiente laboral involucra las dosimetrías personales de los trabajadores y su evaluación comparativa con los valores de referencia, lo cual permite priorizar y tomar acciones preventivas. Esta afirmación deriva de la investigación realizada, consistente en un estudio descriptivo retrospectivo longitudinal en el que se analizaron los registros de los valores dosimétricos personales del periodo 2003-2006, información que se obtuvo a partir de los datos aportados por el Centro de Investigación Nucleares (CIN).

A través de la inspección de las instalaciones, entrevistas a informantes clave y observación del proceso de trabajo, se identificaron los servicios con personal expuesto a radiaciones ionizantes, que incluyeron el sector de radiodiagnóstico, radioterapia médica, medicina nuclear y radiofarmacia. Para las mediciones se utilizó un dosímetro personal diario, supervisado por los encargados de los servicios en estudio, cuyo recambio se efectúa mensualmente; las películas se calibran anualmente en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica de Ezaiza, República de Argentina. El estudio solo consideró los valores dosimétricos corporales y el procesamiento se realizó en condiciones controladas de temperatura.

Los datos se recolectaron por medio de un formulario individual para cada trabajador con las variables a estudiar: ficha de identificación de lugar de trabajo, vigilancia de la dosimetría personal y valoración comparativa con los valores de referencia vigentes a nivel nacional e internacional; el análisis de toda la información recabada se realizó por medios computarizados.

Los resultados obtenidos revelaron que la dosis anual máxima recibida fue, en general, de 15.72 mSv y que la evolución de los valores máximos dosimétricos en el periodo estudiado presentó una tendencia descendente. En cuanto al análisis por sectores, se determinó que las dosis más altas se presentan como sigue en orden decreciente: radioterapia, medicina nuclear y radiodiagnóstico.

Cabe recordar que se considera expuestos a las radiaciones a los trabajadores que laboran en actividades de salud en las áreas de radiodiagnóstico, radioterapia y medicina nuclear; personal que labora en la extracción y tratamiento de materiales radioactivos; en la fabricación de aparatos médicos para radioterapia; trabajo en industrias que utilizan rayos X y sustancias radioactivas (STPS, 2012). Asimismo, se consideran trabajadores profesionalmente expuestos a quienes, dadas las circunstancias en que desarrollan su trabajo habitual, son susceptibles de recibir dosis superiores a un décimo de cualquiera de los límites anuales de dosis establecidos. Por ello, este grupo debe usar dosímetros, los cuales deben ser analizados mensualmente.

Se han realizado estudios sobre los daños a los que está expuesto el tipo de personal arriba mencionado, como el de Murty (2005), estudio de casos y controles en la India cuyo objetivo fue la evaluación de riesgos en el lugar de trabajo y el estudio de las prácticas de trabajo de radiólogos y médicos nucleares durante un año.

Esta investigación evaluó a 24 radiólogos de entre 35 y 45 años, con una antigüedad de 8 a 20 años de servicio en dos centros de radiología del Hospital General de la zona. Los técnicos en radiología y médicos nucleares trabajaban 48 horas a la semana con rotación de turnos y llevaban a cabo de 70 a 80 radiografías por día.

Los controles fueron seleccionados del área de administración, así como de entre los médicos de diferentes departamentos, quienes fueron agrupados por edad, sexo y hábito de fumar. Al finalizar el año, se realizaron entrevistas a los casos y controles, así como se aplicó un

cuestionario de signos y síntomas. El ambiente de trabajo se evaluó mediante una inspección y listas de verificación según la legislación vigente en el país.

Los resultados mostraron que síntomas como cefalea e irritación en la piel fueron los más persistentes. El recorrido de inspección reveló que el lugar de trabajo presentaba deficiencias de orden y limpieza; mal almacenamiento de productos químicos; falta de mantenimiento en el sistema ventilación del hospital; procedimientos realizados de manera inadecuada; y transgresiones de medidas de seguridad, como consumir bebidas y no utilizar guantes durante el revelado de las placas; no obstante, se pudo constatar que, durante su jornada laboral, los radiólogos y médicos nucleares empleaban el equipo de protección personal (delantal de plomo) de manera adecuada.

Con base en los resultados, el estudio destacó como conclusión la importancia de crear un plan de control de riesgos y la relevancia de concientizar al personal en aspectos en seguridad e higiene.

Otro estudio de casos y controles, o prospectivo, fue realizado (Alba, Claudis, Fernando, & Analía, 2006) con el objetivo de evaluar el daño genotóxico de los trabajadores crónicamente expuestos a radiaciones ionizantes en el Hospital Público de La Plata, Argentina. La población de estudio incluyó 15 voluntarios médicos y técnicos del área de rayos X, quienes fueron expuestos a radiaciones; el grupo control fue integrado por 15 empleados no expuestos de áreas administrativas del mismo hospital; la edad promedio para el grupo expuesto fue de 50 años y 51, para el grupo control; los individuos de ambas categorías fueron emparejados por edad, sexo y hábito de fumar.

Todos los voluntarios expuestos poseían entre 5 y 20 años de servicio, por lo que había datos de utilización de dosimetría individual. Sin embargo, las medidas del medio ambiente o los niveles de radiación de la exposición fueron de 3.6 mGy/a. Antes de la extracción de sangre, se

les solicitó la firma de un consentimiento informado y se les realizó un cuestionario para integrar datos personales, hábito de fumar, consumo de alcohol, hábitos higiénicos y dietéticos, exposición previa a radiodiagnóstico, uso de medicamentos o drogas.

Los resultados revelaron una frecuencia de daños significativamente mayor en el grupo expuesto, con deterioro estructural y aneuploidía, en comparación con el grupo control; además se mostró que no existió relación representativa con la antigüedad ni con el hábito de fumar.

De lo anterior, se concluyó que la radiación ionizante produce daños en el ADN de manera directa o indirecta (formación de radicales libres y daño oxidativo), por lo que resulta fundamental el desarrollo de procedimientos para identificar los riesgos de las poblaciones expuestas y establecer programas de prevención. Asimismo, se establece que los daños pueden incrementarse como consecuencia de las faltas o del incumplimiento de las políticas del hospital y procedimientos de seguridad del área nuclear.

Un estudio más, sobre fue biodosimetría retrospectiva entre radiólogos y tecnoradiólogos, fue realizado en EE.UU. (Parveen et al, 2007). Para su realización se tomó como base la medición de las translocaciones cromosómicas en linfocitos de sangre periférica, las cuales sirven para cuantificar la exposición a radiación ionizante, incluso para trabajadores expuestos a dosis bajas.

La investigación consideró una muestra de 152 radiólogos y tecnoradiólogos cuya vida laboral inició después de 1950; estos se estratificaron por dosis acumulada estimada, es decir, se seleccionaron aquellos con exposición a dosis más altas y se excluyeron quienes poseían un diagnóstico previo de cáncer, antecedentes de alteraciones cromosómicas e historial de consumo de tabaco.

Las dosis de radiación de los participantes oscilaban de menos de 10mSv a más de 30mSv. Se permitió un seguimiento de un año, posteriormente, se procedió a obtener una muestra

sanguínea de los participantes para la evaluación. De acuerdo con sexo y edad, se ajustó la relación entre el estimado de la medula ósea roja ocupacional de la dosis absorbida en la frecuencia cGy y traslocación.; y se solicitó a los participantes el llenado de un cuestionario de signos y síntomas específicos de radiaciones ionizantes.

Los resultados de estas pruebas mostraron que los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes durante más de 10 años presentaron mayor grado de traslocación cromosómica, lo que se traduce en más probabilidad de desarrollar cáncer.

Por último, mencionaremos otra evaluación, esta realizada en Turquía (Sahina et al, 2009), sobre efectos genotóxicos por exposición crónica a bajas dosis de radiación ionizantes en trabajadores de medicina nuclear. Este estudio establece que los trabajadores del área de medicina nuclear están ocupacionalmente expuestos a la radiación de manera crónica y es sabido que la radiación ionizante puede causar daños en los cromosomas. Por ello, el estudio utilizó dos indicadores distintos de los métodos de genotoxicidad: de Intercambio de Cromátidas Hermanas, *Sister Chromatid Exchange* (SCE), y de Micronúcleos (MN).

La muestra de esta investigación consistió de 21 trabajadores de medicina nuclear (11 mujeres y 10 hombres) del Hospital Regional de Turquía y consideró dos periodos: en condiciones normales de trabajo y tras un periodo vacacional de un mes. La dosis de radiación se varió de 1.20 a 48.56 mSv, acumulada durante el tiempo de exposición en el trabajo entre dos periodos vacacionales.

Los resultados reportaron que, en todas las materias, los valores de SCE y MN aumentaron significativamente durante la exposición a radiación en comparación con el periodo vacacional. Sin embargo, el efecto genotóxico fue reversible en la mayoría de los sujetos.

Capítulo 5. Evaluación de la estructura y funcionamiento de un servicio de medicina nuclear y su impacto en la salud laboral

En este capítulo final se describen las actividades que se llevaron a cabo, el trabajo de campo y el análisis de los datos obtenidos en el servicio de medicina nuclear evaluado. Asimismo, se muestran las principales recomendaciones para mejorar las condiciones y el medio ambiente laboral.

5.1 Metodología

La presente investigación se llevó a cabo en el servicio de medicina nuclear de una institución del sector salud de tercer nivel de atención ubicado al norte de la Ciudad de México.

Se realizó una evaluación en materia de salud laboral basada en las leyes, reglamentos y normas establecidas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, así como en normatividad nuclear, con el fin de analizar las condiciones y el medio ambiente del lugar de trabajo, la vigilancia de la seguridad, higiene, medio ambiente y protección civil en el departamento de medicina nuclear de la institución mencionada.

La normatividad antes señalada fue la referencia para fundamentar los puntos a inspeccionar en el desarrollo de la verificación y el diagnóstico a fin de conocer las condiciones en que se desarrollan las labores en el servicio de medicina nuclear.

El estudio realizado fue de tipo transversal, es decir, la medida de la causa y efecto se consideran en el mismo lapso de tiempo en el cual ambos coexisten o suceden simultáneamente. Asimismo, fue de carácter descriptivo, en función de las variables, y observacional, es decir, solo describe o mide el fenómeno estudiado sin manipular ningún factor dentro del proceso de investigación (Méndez, 1990).

En la investigación se aplicó el Modelo para la Verificación, Diagnóstico y Vigilancia de la Salud Laboral en las Empresas, PROVERIFICA, el cual se basa en la observación directa y en la revisión documental para efectuar la revisión, análisis y monitoreo integral de la salud en el trabajo en las entidades productivas; está enfocado a cuantificar e incrementar la eficacia y promover la mejora de las empresas en materia de salud laboral (Almirall et al, 2010).

La evaluación, llevada a cabo de abril a junio de 2012, enfocó su análisis en la situación actual de la institución y del servicio de medicina nuclear conforme a lo establecido en la legislación vigente en el país.

Para poder evaluar integralmente la salud laboral en las entidades productivas, así como determinar los riesgos y exigencias a que están expuestos los trabajadores y los probables daños a su salud, es preciso tener un conocimiento lo más completo posible del proceso de trabajo. Para fines de esta investigación se describen, de manera general, las actividades del servicio de medicina nuclear consistentes en: realizar procedimientos diagnósticos y terapéuticos en pacientes mediante la utilización de sustancias radiactivas conocidas como radioisótopos o radiofármacos con el fin de valorar los resultados técnicos obtenidos, los cuales sirven de soporte al diagnóstico clínico y al seguimiento terapéutico, todo ello realizado bajo normas de calidad, radioprotección y seguridad que deben prevalecer en la organización y administración de las áreas correspondientes al servicio.

Los datos primarios del servicio de medicina nuclear necesarios a esta investigación se obtuvieron con ayuda del área administrativa, lo cual sirvió para conocer las condiciones en que se desempeñan los trabajadores y los requisitos mínimos de la empresa en materia de salud ocupacional; asimismo, se utilizaron fuentes secundarias del centro de trabajo (nóminas). A continuación se describe el modelo que se utilizó para la evaluación, el cual incluye tres instrumentos de recolección de información:

a) *Estructura de la Cédula de Información General de la Empresa (CIGE)*, que consta de:

1. Identificación de la empresa: nombre o razón social del establecimiento; dirección, teléfono, país; división, grupo y fracción económica; clase de riesgo; grado de siniestralidad; y prima de riesgo.
2. Datos del personal: número o código del trabajador, edad, sexo, categoría, ocupación o puesto de trabajo; antigüedad en la empresa; planta o división, área, departamento o sección; turno de trabajo; sindicalizado o no sindicalizado, eventual (temporal) o de planta (base); menor de edad, mujer en gestación o lactancia y discapacitado.
3. Jornada laboral: duración de la jornada de trabajo, trabajo por horas, rotación de turnos, guardias, doble turno, horas extra, tarea, destajo, bonos o primas, pausas de trabajo, descanso semanal y vacaciones.

Requisitos. Contestar todas las preguntas. Es necesario que todas las variables que contiene la identificación de la empresa, los datos del personal y de la jornada laboral sean recabadas sin excepción alguna, en el entendido de que la recopilación de la información debe realizarse de manera conjunta con los responsables de la empresa en estudio.

Asimismo, es fundamental contar con el listado de la relación o nómina del personal. Es importante señalar que las variables de los datos del personal deben recolectarse para cada uno de los trabajadores de la empresa, por lo cual se solicitó al centro de trabajo una relación, listado o nómina del personal con las variables mencionadas.

b) *Diagramas Complejos de Salud en el Trabajo (DCST)*. Permiten recolectar por medio de la observación directa la información necesaria para reconstruir los procesos de trabajo, detecta los riesgos y exigencias presentes en el entorno laboral y ofrece una propuesta para prevenir los daños a la salud de los trabajadores. Se componen de los siguientes elementos:

1. Diagramas de flujo del proceso de trabajo. Corresponden a la representación gráfica y ordenada de las distintas fases o etapas del proceso de trabajo y se construyen a partir de diagramas de bloques o con el empleo de la simbología de la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME).
2. Descripción de los diagramas de flujo del proceso de trabajo. Son cuadros de resumen compuestos de cuatro columnas relacionadas entre sí: 1) fases o etapas del proceso de trabajo; 2) ¿qué se hace?; 3) ¿con qué se hace?; y 4) ¿cómo se hace?
3. Cuadro de resumen de los diagramas complejos de salud en el trabajo. Son cuadros descriptivos que constan de seis columnas relacionadas entre sí: 1) fases o etapas del proceso de trabajo; 2) riesgos y exigencias; 3) probables daños a la salud; 4) número de trabajadores expuestos; 5) medidas preventivas actuales; y 6) propuesta de acciones preventivas.

Requisitos.

- Contar con el croquis o *layout* de la empresa. Se utiliza para ubicar físicamente el entorno laboral y los procesos de trabajo, así como planear los recorridos por las diversas instalaciones de la empresa.
- Reconstruir los procesos de trabajo. La finalidad es conocer los cuatro elementos básicos de los procesos laborales (objetos de trabajo, medios de trabajo, el trabajo mismo, y la organización y división del trabajo); los riesgos y exigencias derivados de dichos elementos; y los probables daños a la salud de los trabajadores.
- Obtener evidencia fotográfica y grabada. Para apoyar y reforzar los resultados y conclusiones de la verificación se utiliza este tipo de evidencia, en especial, cuando la evaluación ha sido negativa o poco favorable para el centro de trabajo. Tanto la grabación

de imágenes como las fotografías poseen una contundencia indudable que permite a la administración de la empresa contar con pruebas objetivas de las fallas o problemas que enfrenta.

- c) *Contenido del Cuestionario de Verificación (CV) para evaluar el servicio de medicina nuclear*, consta de tres capítulos divididos de la siguiente manera:

Capítulo I. Evaluación preliminar del establecimiento, integra un total de 95 preguntas y diez apartados:

1. Edificios, locales, instalaciones y áreas del establecimiento
2. Orden y limpieza
3. Sistemas contra incendio
4. Instalaciones eléctricas
5. Manejo, transporte y almacenamiento de materiales
6. Señales, avisos de seguridad y código de colores
7. Medio ambiente laboral
8. Herramientas, equipos y maquinaria
9. Equipo de protección personal (EPP)
10. Servicios para los trabajadores

Capítulo II. Reglamento General de Seguridad Radiológica, contiene un total de 248 preguntas y siete apartados:

1. Sistema de limitación de dosis
2. Fuentes de radiación ionizante
3. Instalaciones radiactivas
4. Equipos
5. Permisario, encargado de la seguridad radiológica y POE

6. Aplicaciones médicas

7. Accidentes radiológicos y medidas preventivas de seguridad

Capítulo III. Condiciones de Seguridad e Higiene, incluye un total de 73 preguntas y cinco apartados:

1. Obligaciones del patrón

2. Obligaciones del POE

3. Reconocimiento y registro

4. Evaluación y control

5. Programa específico de seguridad e higiene

Tiempos promedio estimados de la verificación. Estos tiempos son variables y dependen, principalmente, de tres factores: el tamaño de la empresa, la complejidad de las operaciones que realiza y el número de procesos de trabajo. Por lo tanto, de manera general, se puede decir que el llenado de cada capítulo del Cuestionario de Verificación requiere de 4 a 8 horas y la verificación completa se realiza en un periodo de alrededor de 5 a 10 días.

El procesamiento y el análisis de la información se realizaron por medio del *software* de PROVERIFICA, ya que este permite mostrar los resultados por medio de cuadros de resumen o tablas estadísticas con los totales a examinar y facilita la toma de decisiones para la propuesta de control de lo encontrado.

Para la aplicación de este modelo, en el centro de medicina nuclear ya mencionado, se realizaron las siguientes actividades:

Se convocó una junta general con el jefe de servicio de medicina nuclear por medio del Físico Médico, con el fin de dilucidar las inquietudes, dudas y presentar las características de la evaluación para que se nos brindara la información requerida. Asimismo, se describió el plan de

trabajo y se obtuvieron datos preliminares detallados sobre el proceso de trabajo y las actividades desarrolladas.

Se realizó una visita al sitio de investigación para el reconocimiento inicial de las instalaciones, en general, así como para conocer las instalaciones del servicio de medicina nuclear, en particular. Se efectuó la observación preliminar de las condiciones y los principales procesos de trabajo, riesgos y exigencias, y medidas de seguridad del servicio. Se recabó evidencia fotográfica y se sondeó a los trabajadores sobre sus tareas; por último, se aplicó el Cuestionario de Verificación para evaluar servicios de medicina nuclear con fundamento en el Reglamento General de Seguridad Radiológica y condiciones de Seguridad e Higiene, además, se realizó la reconstrucción de los procesos de trabajo.

Otra fase importante fue la revisión y recolección de la documentación necesaria del servicio de medicina nuclear en cuanto a seguridad e higiene de acuerdo con la legislación vigente en el país, lo cual se realizó con el apoyo del área administrativa.

Posteriormente, se llevó a cabo la verificación y diagnóstico preliminar mediante la Cédula de Información General de la empresa (CIGE) con los datos obtenidos del área de medicina nuclear.

Toda la información recabada en las etapas anteriores, sirvió para la reconstrucción de los procesos de trabajo de acuerdo con los parámetros del modelo de PROVERIFICA, con el fin de orientar a la toma de decisiones para la modificación y mejora de las condiciones de trabajo.

El procesamiento y análisis de la información también se llevó a cabo según las directrices del modelo PROVERIFICA, con lo que fue posible establecer las acciones de prevención y control pertinentes a los problemas encontrados para conocimiento del personal involucrado.

5.2 Resultados

En este apartado se describen los resultados generales obtenidos de la aplicación de los instrumentos de recolección de información: 1) La Cedula de Información General de la Empresa (CIGE); 2) los Diagramas Complejos de Salud en el Trabajo (DCST); y 3) el Cuestionario de Verificación (CV) correspondiente al servicio de medicina nuclear evaluado de una institución de tercer nivel de salud en el Distrito Federal en el periodo de abril a junio del año 2012.

5.2.1 Cédula de Información General de la Empresa, CIGE

5.2.1.1 Identificación de la empresa

De acuerdo al catálogo de actividades para la clasificación de las empresas en el seguro de riesgos de trabajo correspondiente al Reglamento de la Ley del Seguro Social en materia de afiliación, clasificación de empresas, recaudación y fiscalización (IMSS, 2002), el servicio de medicina nuclear corresponde a la división económica 9 relativa a servicios sociales y comunales; grupo económico 92 referente a servicios médicos, asistencia social y veterinarios; fracción industrial 921 relativa a servicios médicos; clase de riesgo I o riesgo bajo, con una siniestralidad de 1.13065; su prima de riesgo se calcula en 1.06935, cifras correspondientes a la totalidad de la institución de salud.

5.2.1.2 Datos del personal

El servicio de medicina nuclear cuenta con un total de 10 trabajadores de entre 26 y 48 años de edad, distribuidos por sexo de la siguiente manera: 50% corresponde al femenino y el otro 50 al masculino. La unidad cuenta con seis puestos de trabajo: administrativo, físico, médico nuclear, técnico radiólogo, abastecedor de material radiactivo (*outsourcing*) y residente de radiología; el

personal es sindicalizado y de planta, a excepción del último puesto de trabajo que corresponde a personal eventual.

5.2.1.3 Jornada Laboral

La jornada laboral diaria tiene una duración de ocho horas y solo se trabaja en el turno matutino, con un horario de lunes a viernes de 6:00 a.m. a 15:00 p.m, con una hora respectiva para desayuno y comida. Las tareas que realizan los trabajadores del área no responden al perfil profesional del trabajador, es decir, sus labores no corresponden a las especificadas para el puesto.

La institución otorga bonos conforme a lo establecido en el contrato colectivo de trabajo por:

- a) Alto riesgo de trabajo, equivalente al 30% del salario base.
- b) Asistencia y puntualidad, mensual, es equivalente al 10% del salario base.
- c) Productividad, anual, equivalente a un mes y medio del salario base.
- d) Vales de fin de año.

Además, existe un fondo de ahorro que se entrega anualmente a cada trabajador de base.

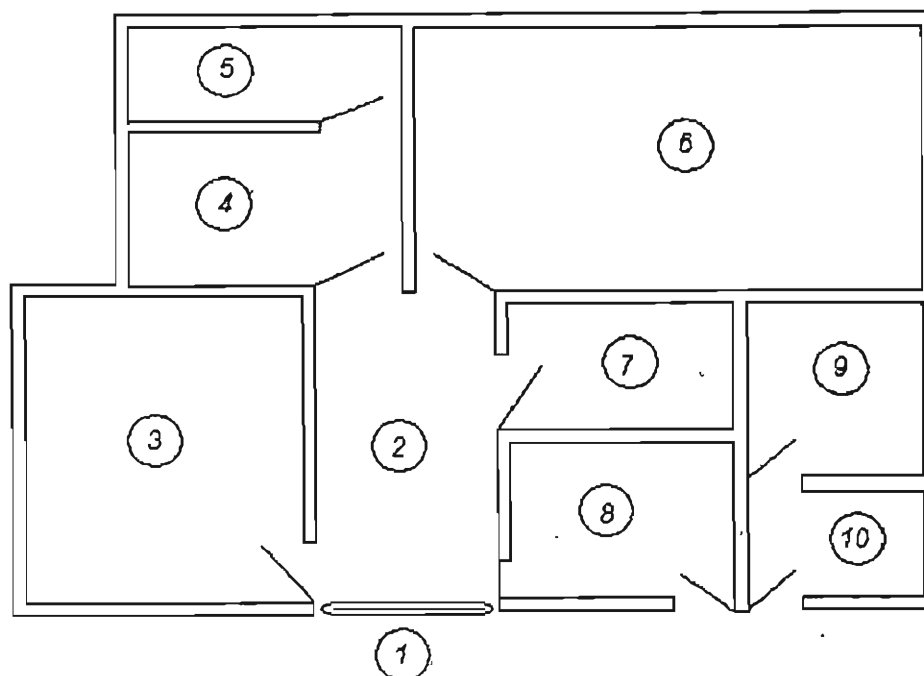
El personal descansa sábados, domingos y los días festivos oficiales; también cuenta con pase de salida de 6 horas al mes y permisos económicos por 12 días al año, derecho que puede ser canjeado, es decir, el trabajador puede renunciar a tomar esos 12 días y se le remuneran con dinero en efectivo. Los trabajadores de este servicio tienen vacaciones a partir de los seis meses y un día laborados; existen 3 variantes de vacaciones:

- a) Primer periodo: 10 días hábiles a elegir de enero a junio del año en curso.
- b) Segundo periodo: 10 días hábiles a elegir de julio a diciembre del año en curso.

Asimismo, el servicio cuenta con pago de vacaciones por riesgo, esto es, 12 días de salario de vacaciones anuales.

A continuación, en la figura 1 se muestran las áreas físicas del servicio de medicina nuclear, distribuidas en una superficie total de 65m².

Figura 5. Croquis del servicio de medicina nuclear por áreas.



Fuente: Recorrido de observación: Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del Tercer Nivel de Atención, 2012.

Nº	Área	Nº	Área
1	Entrada principal	6	Cuarto de gammagrafías
2	Área de espera de pacientes	7	Baño exclusivo de pacientes
3	Laboratorio de Radioinmunoanálisis	8	Oficina del jefe de servicio
4	Área de radiofarmacia o preparación	9	Archivo
5	Almacén radiactivo "cuarto caliente"	10	Control administrativo

5.2.2 Diagramas Complejos de Salud en el Trabajo, DCST

En este apartado se explica en forma general el proceso laboral que se realiza en el servicio de medicina nuclear, seguido del diagrama de flujo del proceso de trabajo que nos permite tener una representación gráfica y rápida de las actividades. Asimismo, se describe el Diagrama de Flujo del Proceso de Trabajo y, finalmente, el cuadro de Resumen del Diagrama Complejo de Salud en el Trabajo, que, en conjunto, nos brindan un panorama amplio de los daños a la salud a los que están expuestos los trabajadores en cada etapa del proceso, así como las medidas preventivas existentes para la realización de las actividades.

5.2.2.1 Diagrama de flujo del proceso de trabajo.

Para comenzar con la descripción general del proceso de trabajo es necesario comentar que el servicio de medicina nuclear cuenta con una gammacámara con detector Starcam 400 marca General Electric de procedencia estadounidense. Los estudios frecuentes en este servicio son: gammagrafía de la glándula tiroides, hepática, renal y ósea. El proceso de trabajo consta de 4 etapas radiofarmacia. aplicación. estudios y alta. De manera general inicia con la solicitud de unidosis de material radiactivo específico del paciente citado, se aplica el material radiactivo al paciente, se realiza el estudio y, finalmente, se proporcionan las indicaciones y se da de alta del servicio. A continuación se presentan las fases en las que se desarrolla el trabajo en medicina nuclear de esta institución de salud.

Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de trabajo, servicio de medicina nuclear, 2012.



Fuente: Recorrido de observación; Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del Tercer Nivel de Atención, 2012.

5.2.2.2 Descripción del diagrama de flujo del proceso de trabajo

Cuadro 3
Descripción del diagrama de flujo del proceso de trabajo.
Servicio de medicina nuclear. México, 2012.

Fases o etapas del proceso de trabajo	¿Qué se hace?	¿Con qué se hace?	¿Cómo se hace?
Radiofarmacia	Citar a los pacientes con indicaciones de gammagrama de las áreas de consulta externa y hospitalización. Solicitar las unidosis de material radiactivo al proveedor, de acuerdo al número de estudios programados. El técnico radiólogo recibe las unidosis.	Bolígrafo y cuadernillo de citas, se realiza manualmente. Las unidosis pueden contener: cápsulas de yodo 131, tecnecio 99 con marcadores de MAG-3 (mercapto acetil triglicina), MDPA y meborofenin, se realiza con una revisión visual y de forma manual, una vez al día durante la jornada de trabajo.	En el cuadernillo de citas se anotan los pacientes candidatos al estudio; se les dan las indicaciones pertinentes para el día de su cita; posteriormente se solicitan las unidosis vía telefónica a la empresa proveedora. En la oficina de recepción una trabajadora, a partir de las 8:00 a.m., realiza las citas del paciente proveniente de consulta externa y recibe la solicitud de estudios urgentes de hospitalización. Esta tarea se repite de 6 a 10 veces hasta las 10:00 a.m. Se encarga, además, de realizar el pedido de las unidosis vía telefónica. El proveedor externo entrega las unidosis solicitadas en el servicio de medicina nuclear a las 6:00 a.m. El técnico radiólogo encargado de la semana las recibe y verifica que la etiqueta de cada unidosis contenga: nombre del paciente, tipo de radioisótopo, dosis y forma química;

Fases o etapas del proceso de trabajo	¿Qué se hace?	¿Con qué se hace?	¿Cómo se hace?
			además, confirma que los contenedores de plomo se encuentren en buen estado y libres de fugas.
Aplicación	Administración de las unidosis al paciente: vía oral o vía intravenosa de acuerdo al estudio programado.	Activímetro, jeringa desechable de 5ml con material radiactivo (cápsulas de yodo ¹³¹), torundas, ligadura, solución salina 0.9%.	El técnico radiólogo recibe al paciente y lo conduce a la zona de radiofarmacia donde administra la unidosis. En caso de administración intravenosa para gammagrama óseo, renal y vías biliares (1 estudio de cada uno) identifica la etiqueta, quita el sello con una charrasca y manipula con cuidado el material radiactivo; utiliza una jeringa de 5ml. previamente dosificada con el material radiactivo por medio del activímetro. Toma una ligadura y una torunda con alcohol, aplica el material radiactivo en la vena braquial del brazo derecho y deja actuar durante 2 horas. Una vez terminada la aplicación coloca la jeringa en el contenedor blindado y se lleva a radiofarmacia. En caso de vía oral para gammagrama tiroideo (5 estudios programados), el técnico radiólogo coloca el contenedor con la cápsula de yodo ¹³¹ en el activímetro para la verificación de la dosis, posteriormente, se le da a beber al paciente con agua natural, le da indicaciones y retira el paciente del servicio, pues el estudio se realiza 24 hrs. después de la toma. Tras las aplicaciones, el personal de la empresa proveedora de unidosis verifica que hayan sido aplicadas, recolecta los desechos y los retira para su destrucción.
Estudios	Se realiza el estudio programado	Gammacámara con detector y equipo computacional para el registro de la actividad radiactiva.	El técnico radiólogo guía al paciente al cuarto de estudios donde se le dan indicaciones; permanece con el paciente hasta el término del estudio. Esta tarea se realiza de 4 a 5 veces al día.
Alta	El técnico radiólogo da indicaciones post	Se realiza de manera verbal y se entregan	Al terminar el estudio, el técnico radiólogo pide al paciente

Fases o etapas del proceso de trabajo	¿Qué se hace?	¿Con qué se hace?	¿Cómo se hace?
	estudio al paciente y la fecha de entrega de sus resultados	indicaciones por escrito.	incorporarse y le entrega las indicaciones de salida y de convivencia familiar.

Fuente: Recorrido de observación: Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del Tercer Nivel de Atención, 2012.

5.2.2.3 Cuadro de resumen del diagrama complejo de salud en el trabajo

Cuadro 4
Resumen del diagrama complejo de salud en el trabajo.
Servicio de Medicina Nuclear, México, 2012.

Fases o etapas del proceso de trabajo	Riesgos o exigencias	Probables daños a la salud	Trabaja-dores expuestos	Medidas preventivas actuales	Propuesta de acciones preventivas
Radiofarmacia	I. Radiaciones ionizantes	- Cefalea - Astenia, adinamia, pérdida de apetito - Pérdida de cabello - Síndrome de irradiación aguda - Radiodermatitis, radiocatáratas, infertilidad temporal o permanente, alteraciones hematológicas (leucemias) - Carcinogénesis	5	Bata de algodón	- Medición de radiaciones ionizantes - Vigilancia del funcionamiento y mantenimiento de la gammacámara. - Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. - Vigilancia periódica del mantenimiento de las instalaciones. - Aislamiento del área de estudios de gammagrafía del personal médico y técnico. - Actualización de los procedimientos de seguridad y vigilancia radiológica. - Capacitación sobre seguridad radiológica al personal expuesto. - Implementación de EPP específico para radiaciones ionizantes (collarín de plomo para tiroides, chaleco de plomo, entre otros), guantes de látex.

Fases o etapas del proceso de trabajo	Riesgos o exigencias	Probables daños a la salud	Trabajadores expuestos	Medidas preventivas actuales	Propuesta de acciones preventivas
	III. Trabajo sedentario	- Obesidad - Insuficiencia venosa crónica.			- Estudio ergonómico del puesto de trabajo. - Implementación de programa de gimnasia laboral. - Promoción de la salud en temas de obesidad, alimentación, sedentarismo, entre otros.
	IV. Trabajo monótono y requiere atención	- Fatiga - Estrés			- Introducción de pausas laborales.

Continuación

Fases o etapas del proceso de trabajo	Riesgos o exigencias	Probables daños a la salud	Trabajadores expuestos	Medidas preventivas actuales	Propuesta de acciones preventivas
Aplicación	I. Radiaciones ionizantes	- Cefalea - Astenia, adinamia, pérdida de apetito - Pérdida de cabello - Síndrome de irradiación aguda - Radiodermatitis, radiocatáratas, infertilidad temporal o permanente, alteraciones hematológicas (leucemias) - Carcinogénesis	2	Bata de algodón	- Medición de radiaciones ionizantes - Vigilancia del funcionamiento y mantenimiento de la gammacámara. - Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. - Mantenimiento periódico de las instalaciones. - Aislamiento del área de estudios de gammagrafía del personal médico y técnico. - Actualización de los procedimientos de seguridad y vigilancia radiológica - Capacitación sobre seguridad radiológica al personal expuesto. - Implementación de EPP (collarín de plomo para tiroides, chaleco de plomo, entre otros), guantes de látex.

Continuación

Fases o etapas del proceso de trabajo	Riesgos o exigencias	Probables daños a la salud	Trabajadores expuestos	Medidas preventivas actuales	Propuesta de acciones preventivas
	II. Biológicos	- Hepatitis viral, VIH			- Estudio epidemiológico - Capacitación del personal sobre el manejo de Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI) - Botes de basura específicos para este tipo de desechos - Plan de emergencia para accidentes por instrumental punzocortante contaminado.
	IV. Trabajo monótono y peligroso	- Fatiga, estrés			- Estudio ergonómico del puesto de trabajo - Implementación de programa de gimnasia laboral - Promoción de la salud en temas de obesidad, alimentación, sedentarismo, entre otros.
	V. Accidentes	- Caídas, luxaciones, esguinces, heridas, fracturas.			- Programa de seguridad e higiene en el trabajo. - Mantenimiento periódico de las instalaciones del servicio. - Colocación de material antiderrapante.
Estudios	I. Radiaciones ionizantes	- Cefalea - Astenia, adinamia, pérdida de apetito - Pérdida de cabello - Síndrome de irradiación aguda - Radiodermatitis, radiocatáratas, infertilidad temporal o permanente, alteraciones hematológicas (leucemias) - Carcinogénesis	6	Bata de algodón	- Medición de radiaciones ionizantes. - Vigilancia del funcionamiento y mantenimiento de la gammacámara. - Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. - Vigilancia periódica del mantenimiento de las instalaciones. - Aislamiento del área de estudios de gammagrafía del personal médico y técnico. - Actualización de los procedimientos de seguridad y

Continuación

Fases o etapas del proceso de trabajo	Riesgos o exigencias	Probables daños a la salud	Trabajadores expuestos	Medidas preventivas actuales	Propuesta de acciones preventivas
					vigilancia radiológica - Capacitación sobre seguridad radiológica al personal expuesto. - Implementación de EPP (collarín de plomo para tiroides, chaleco de plomo, entre otros), guantes de látex.
Alta	I. Radiaciones ionizantes	- Cefalea - Pérdida de cabello - Síndrome de irradiación aguda - Radiodermatitis, radiocatáratas, infertilidad temporal o permanente, alteraciones hematológicas (leucemias)	2	Bata de algodón	- Medición de radiaciones ionizantes. - Vigilancia del funcionamiento y mantenimiento de la gammacámara. - Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. - Vigilancia periódica del mantenimiento de las instalaciones. - Aislamiento del área de estudios de gammagrafía del personal médico y técnico. - Actualización de los procedimientos de seguridad y vigilancia radiológica - Capacitación sobre seguridad radiológica al personal expuesto. - Implementación de EPP específico (collarín de plomo para tiroides, chaleco de plomo, entre otros.), guantes de látex.

Fuente: Recorrido de observación: Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del Tercer Nivel de Atención, 2012.

5.2.3 Cuestionario de Verificación, CV

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través del instrumento de recolección empleado, es decir, el Cuestionario de Verificación.

Debido a su importancia, es necesario comentar que de acuerdo con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917):

“El patrón estará obligado a observar, de acuerdo con la naturaleza de su negociación, los preceptos legales sobre higiene y seguridad en las instalaciones de su establecimiento, y a adoptar las medidas adecuadas para prevenir accidentes en el uso de las máquinas, instrumentos y materiales de trabajo, así como a organizar de tal manera este, que resulte la mayor garantía para la salud y la vida de los trabajadores, y del producto de la concepción, cuando se trate de mujeres embarazadas.” (p.97).

En el Capítulo I: *Evaluación Preliminar de la Empresa* se observó que las instalaciones como pisos, techos, aire acondicionado y el área donde se realizan los estudios de gammagrafía carecen de mantenimiento; no cuentan con personal exclusivo de intendencia; el área de guarda se encuentra desordenada con un anaquel no fijo en el que se depositan contenedores de sustancias sin etiqueta; además, hay cajas colocadas a 2 metros de altura sin ninguna señalización; el servicio no cuenta con botes de basura para clasificar según el tipo de desecho; los casilleros, regaderas y baños que utiliza el personal se encuentran en mal estado y no existen sistemas contra plagas o fauna nociva (STPS, 2008).

Con respecto a sistemas contra incendio, únicamente se cuenta con dos extintores fuera del servicio; los materiales e instalaciones con riesgo de incendio carecen de señalización e identificación (STPS, 2010). Las instalaciones eléctricas se encuentran en mal estado y no

atienden a la recomendación de estar ocultas, no poseen dispositivos de seguridad ni se encuentran identificadas y señalizadas según su voltaje.

La señalización en general está en malas condiciones, no es visible y la tubería no se encuentra identificada con el código de colores establecido en la normatividad.

Respecto al EPP, cuentan con un dosímetro ambiental.

En relación al Capítulo II: *Intervención de los Niveles Directivos*, el desempeño de la institución es nulo, pues no cuenta con políticas de salud en el trabajo ni existe responsable de dicha área; es inexistente la participación de las gerencias, jefaturas y supervisiones hacia la salud en el trabajo; carece de planes, objetivos y sistemas o programas de salud en el trabajo; así como los medios de información interna se enfocan exclusivamente en puntos específicos de protección civil.

En cuanto al Capítulo III: *Inducción y Capacitación*, efectivamente, existe inducción a la empresa y al trabajo, pero solo en relación a la reglamentaria, de acuerdo con el contrato colectivo de trabajo, y referente a recursos humanos. En términos de salud en el trabajo, gerencias, jefaturas y supervisiones, es nula.

Ahora bien, el Capítulo IV: *Reglamento General de Seguridad Radiológica* fue el mejor evaluado, pues, en cuestión normativa, el servicio de medicina nuclear cumple con las medidas mínimas requeridas para evitar la cancelación de la licencia de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). Sin embargo, los procedimientos solicitados no están actualizados ni se aplican en su totalidad.

El POE solo cuenta con dosímetro ambiental que, anualmente, se envía a calibrar y a registrar la cantidad de radiación a la que estuvieron expuestos los trabajadores, el resultado no se les entrega a todos, por tanto, algunos desconocen la dosis de radiación que recibieron durante sus labores (SE, 1999).

Asimismo, el personal que labora en el servicio de medicina nuclear carece de vigilancia médica (SE, 1999); el trabajador no cuenta con un expediente clínico ni exámenes médicos periódicos, por consiguiente, resulta complicada la detección de efectos provocados por el medio ambiente de trabajo en su salud.

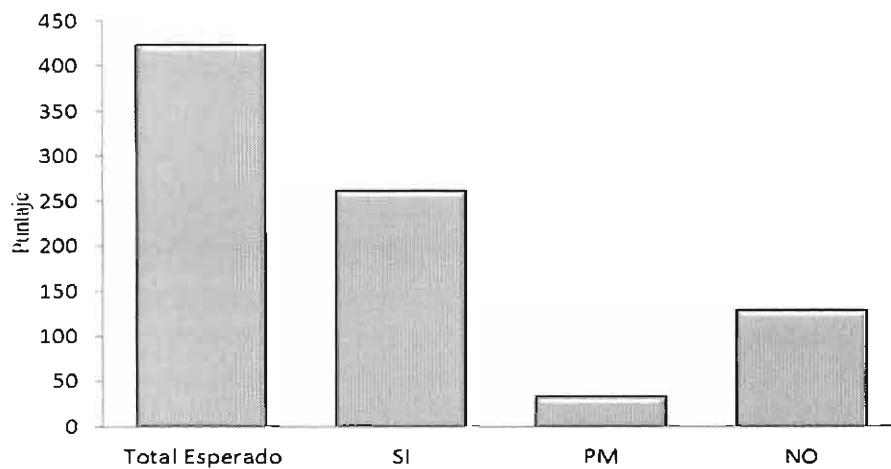
En el Capítulo V: *Condiciones de Seguridad e Higiene*, referente a las obligaciones del patrón y el POE, se observó que los técnicos radiólogos no han realizado ningún curso de actualización en la materia en los últimos dos años, no obstante lo cual participan en el plan de emergencia de seguridad radiológica. Esta información permite considerar un desconocimiento del POE en materia de nuevas técnicas empleadas para su protección y la del paciente.

En relación al registro y control de las actividades, el servicio presenta parcialmente los requerimientos del marco normativo; así como carece de un programa de seguridad e higiene (STPS, 1999).

5.2.3.1 Gráficas

Como se puede observar en la gráfica I, el servicio evaluado solo cumple con poco más del 50% del total esperado, mientras que el no cumplimiento equivale al 30% y el cumplimiento parcial al 8%; es decir, que el centro de trabajo de medicina nuclear cumple con menos del 60% de los requerimientos mínimos establecidos por la normatividad.

Gráfica 1
Puntaje del Total Esperado y Total Real
según opciones de respuesta de la Verificación.
Servicio de Medicina Nuclear. México, 2012

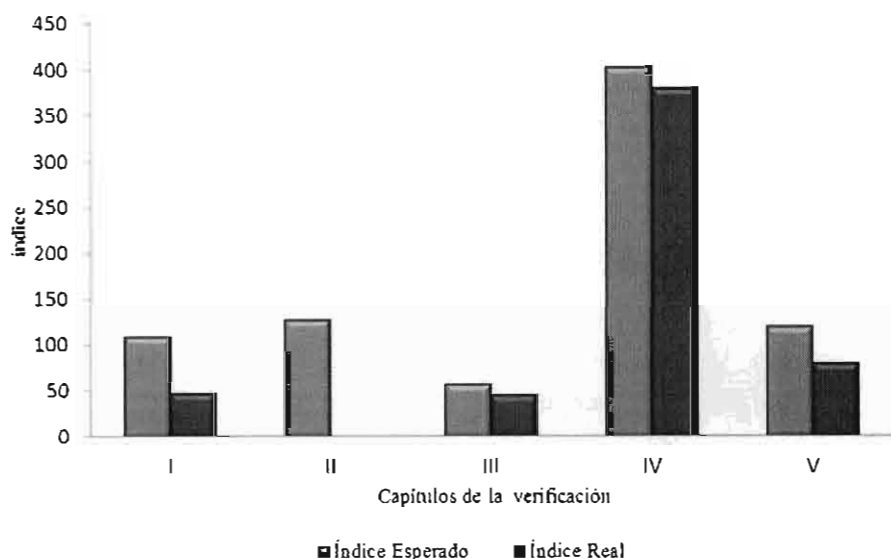


Total Esperado y opciones de respuesta de la verificación
Fuente: Cuestionario de Verificación: Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del tercer nivel de atención, 2012.

En la siguiente gráfica se comparan los índices esperados de cada uno de los capítulos que componen el cuestionario de verificación con el índice real obtenido; donde por índice esperado se entiende la puntuación máxima que se puede obtener en la evaluación de las preguntas con respuesta SÍ.

Como se puede apreciar, los índices reales para los Capítulo I, III y V se encuentran por debajo de los índices esperados; y para el Capítulo II es nulo. Esto nos indica que los índices reales de la institución resultan verdaderamente deficientes. Sin embargo, en el Capítulo IV podemos observar que el índice real se encuentra arriba del 80% del índice esperado, lo cual permite afirmar que este capítulo cumple con lo mínimo requerido por la normatividad vigente de nuestro país.

Grafica 2
Índice Esperado e Índice Real
según capítulos de Verificación.
Servicio de Medicina Nuclear. México, 2012.

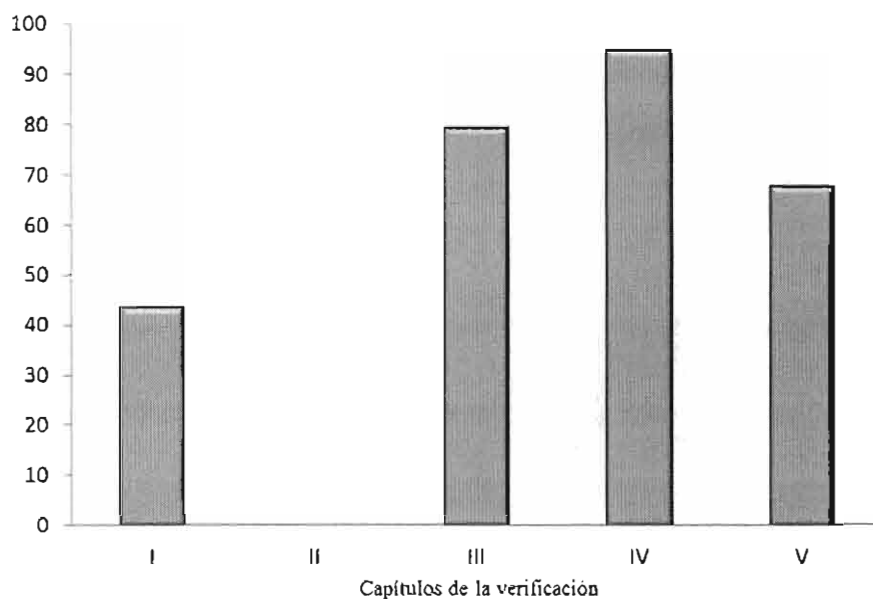


Fuente: Cuestionario de Verificación: Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del tercer nivel de atención, 2012.

- I. Evaluación Preliminar de la Empresa
- II. Intervención de los Niveles Directivos
- III. Inducción y Capacitación
- IV. Reglamento de Seguridad Radiológica
- V. Condiciones de Seguridad e Higiene

En la gráfica 3 se presenta el porcentaje de eficacia, el cual, para fines prácticos, se define como la fuerza, capacidad o fortaleza que tiene una empresa para resolver sus problemas de salud en el trabajo (Franco, 2003). En los resultados destaca que el peor porcentaje en la evaluación lo encontramos en el Capítulo II con porcentaje nulo (0%).

Gráfica 3
Porcentaje de Eficacia Total
según capítulos de la Verificación.
Servicio de Medicina Nuclear. México, 2012.



Fuente: Cuestionario de Verificación: Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del tercer nivel de atención, 2012

- I. Evaluación Preliminar de la Empresa
- II. Intervención de los Niveles Directivos
- III. Inducción y Capacitación
- IV. Reglamento de Seguridad Radiológica
- V. Condiciones de Seguridad e Higiene

5.2.3.2 Hoja de resultados

Los datos del cuadro 1 permiten afirmar que el Total Esperado fue de 424 preguntas, de las cuales el 62% fue respondido; sin embargo, el porcentaje de eficacia del servicio de medicina nuclear resultó con un 65%, mismo que, de acuerdo al nivel de eficacia del modelo PROVERIFICA, equivale a Malo, es decir, necesita implementar sistemas que beneficien y promuevan la aplicación de la normatividad vigente en nuestro país referente a salud laboral y seguridad e higiene en el lugar de trabajo.

Cuadro 5
Porcentajes de Eficacia
según Capítulos.
Servicio de Medicina Nuclear. México, 2012.

Capítulos	TE	TSÍ	%SÍ	TPM	%PM	TNO	%NO	IE	IR	%E	NE
I. Evaluación Preliminar de la Empresa	60	15	25	19	31.7	26	43.3	110	48	43.6	MM
II. Intervención de los niveles Directivos	64	0.0	0.0	0.0	0.0	64	100	128	0.0	0.0	N
III. Inducción y Capacitación	29	21	72.4	4.0	13.8	4.0	13.8	58	46	79.3	M
IV. Reglamento General de Seguridad Radiológica	201	188	93.5	4.0	2.0	9.0	4.5	42	380	94.5	MB
V. Condiciones de Seguridad e Higiene	70	37	61.6	7.0	11.7	26	26.7	120	81	67.5	M
Total	424	261	61.5	34	8.01	129	30.4	848	555	65.4	M

*Porcentaje de Eficacia

**Nivel de Eficacia

Fuente: Cuestionario de Verificación. Servicio de Medicina Nuclear, Hospital del Tercer Nivel de Atención, 2012.

5.3 Conclusiones

En la presente investigación se identificaron las características de la empresa, se evaluaron los niveles directivos, la inducción y capacitación del personal, así como, finalmente, el cumplimiento de la normatividad vigente del país en materia de seguridad e higiene y el Reglamento General de Seguridad Radiológica en el servicio de medicina nuclear de una institución de salud de tercer nivel de la Ciudad de México.

Para cumplir con sus objetivos, en el estudio se utilizaron tres instrumentos de recolección de información de acuerdo con el modelo PROVERIFICA.

En función de la información recabada, podemos concluir que:

De acuerdo a los resultados obtenidos en la CIGE, el servicio de medicina nuclear evaluado se clasifica como de riesgo bajo; sin embargo, esta clasificación no corresponde a un

proceso de trabajo en el que se emplean radiaciones ionizantes, lo cual se manifiesta de modo contundente en los resultados obtenidos en la evaluación.

En este servicio labora personal relativamente joven, sin predominio de ningún sexo; no obstante, la consideración del género resulta importante debido a que las mujeres pueden tener exposiciones que alteren el producto de una concepción.

Por otro lado, el personal está integrado por 10 trabajadores considerados como POE. En este aspecto es relevante señalar que algunos técnicos no cumplen con el perfil profesional necesario, sino que son entrenados para ocupar la plaza de forma circunstancial y su capacitación se reduce a cursos breves de protección radiológica y a la experiencia que adquieren, paulatinamente, durante el desempeño de las labores.

La jornada laboral del personal se halla establecida de acuerdo con la ley y sus prestaciones económicas son definidas según el riesgo al que están expuestos, lo que convierte su actividad en una comercialización del riesgo a la exposición, lo cual, obviamente, no protege al POE contra las radiaciones ionizantes.

Por otro lado, se puede decir que los trabajadores disfrutan de estabilidad laboral, pues la mayor parte de ellos posee trabajo de planta y se encuentra sindicalizado.

Ahora bien, a partir de los resultados obtenidos en los DCST, el proceso de trabajo del servicio de medicina nuclear se reconstruyó con cuatro fases en las cuales los trabajadores están expuestos a riesgos derivados de los medios de trabajo, es decir, a radiaciones ionizantes. Es importante destacar que el servicio únicamente realiza estudios de gammagrafía por medio de unidosis de radiofármacos, por lo que la fuente principal de exposición son los pacientes. Sabemos que de la dosis y el tiempo de exposición a la radiación dependen los daños a la salud que pueda presentar el POE, los cuales van desde cefaleas hasta carcinogénesis. En este caso de estudio, el personal del servicio ha estado expuesto durante un largo periodo a radiaciones

ionizantes sin conocer, con exactitud, la cantidad de dosis que ha recibido durante su vida laboral porque carece de un conteo confiable de exposición, lo cual hace que este personal posea mayor riesgo de desarrollar daños en su salud.

De acuerdo con declaraciones realizadas por los técnicos del servicio, han presentado signos y síntomas inusuales, sin embargo, no lo han reportado debido a que no existe un procedimiento implementado en el servicio para el seguimiento de estas alteraciones derivadas del trabajo. Por ello, es menester la implementación de acciones preventivas y correctivas inmediatas para disminuir la exposición y mejorar la calidad de vida de los trabajadores. Vale la pena mencionar, que el personal, efectivamente, concibe su trabajo como peligroso.

Por su parte, las exigencias predominantes en el área administrativa son las derivadas de la actividad del trabajador, principalmente porque se trata de un trabajo sedentario; los problemas a la salud generados son múltiples y llegan a ser tan graves que provocan incapacidad para laborar parcial o totalmente.

Según los resultados obtenidos del CV en el servicio de medicina nuclear, la exposición a riesgos físicos (radiaciones ionizantes) resulta ser la de mayor prioridad por sus repercusiones en la salud; no obstante, en este sentido, se debe considerar también el evidente descuido en el mantenimiento de las instalaciones.

El CV permitió detectar el alto desconocimiento de los niveles directivos en materia salud laboral, así como su nula atención a este tema. Además, destaca la ausencia de experiencia y formación del personal que no cuenta con la inducción y capacitación indispensables para realizar sus tareas diarias, lo cual habla del interés mínimo en prevención y cuidado de la salud de los trabajadores. Por lo anterior, para incrementar la profesionalización del servicio se deben desarrollar e implementar, de forma estricta, requisitos de formación mínima en materia nuclear.

En cuanto a las condiciones de las instalaciones, de acuerdo a la NOM-027-NUCL-1996, especificaciones para el diseño de las instalaciones radiactivas tipo II clases A, B y C, el área de realización de estudios debería contar con un área independiente. Pisos y techos se encuentran en mal estado y carentes de mantenimiento, lo cual es un generador de accidentes.

El equipo fijo de la gammacámara, donado por otro hospital (no se indica nombre), se encuentra en funcionamiento, tiene una antigüedad de 15 años y carece de mantenimiento preventivo; solo en caso de que el técnico radiólogo refiera alguna falla, el equipo es sujeto a mantenimiento correctivo.

Sumado a lo anterior, no existe un control del paciente posterior a la administración del isótopo radiactivo, lo cual se traduce en una falta de control en los pacientes con radiofármacos, mala organización y carencia de procedimientos para el manejo del paciente de medicina nuclear, lo cual representa una fuente inminente de daños a la salud del POE y del público en general.

Otro punto importante a destacar consiste en que el personal no emplea constantemente los guantes de látex durante su proceso de trabajo como EPP.

Todo lo anteriormente expuesto, evidencia que el centro de trabajo no cumple con los estándares mínimos de la normatividad vigente en materia de salud laboral; así como, dadas las malas condiciones laborales, demuestra poseer riesgos potenciales generadores de enfermedades y accidentes de trabajo.

5.4 Recomendaciones

Es importante señalar que en este capítulo, dedicado a las recomendaciones, se sugieren algunas actividades capaces de disminuir o eliminar las problemáticas encontradas a través de la evaluación del servicio de medicina nuclear.

Estas recomendaciones tienen la finalidad de que la institución de salud pueda implementar las medidas necesarias para superar los resultados negativos obtenidos en el proceso de verificación, pues al alcanzar el nivel máximo de eficacia se posibilitará el desarrollo de un óptimo ambiente de trabajo, en el cual se fomente el bienestar del personal y se incremente la productividad. Asimismo, se pretende brindar alternativas para la mejora continua del centro de trabajo basadas en procesos de trabajo seguros y en la corrección de las anomalías detectadas en las instalaciones, todo ello en cumplimiento de la normatividad vigente en la materia.

Por lo anterior, con base en los problemas encontrados y en lo estipulado en la legislación vigente de nuestro país, se realizan las siguientes recomendaciones:

Cuadro 6
Recomendaciones
Servicio de Medicina Nuclear, 2012.

De acuerdo a la CIGE	
Reclasificar el estado de riesgo bajo para las actividades que utilizan radiaciones ionizantes.	
Atención minuciosa en la selección de personal no relacionado al campo de la medicina nuclear; es decir, existe personal en el servicio que no se encuentra capacitado para la función que desempeña.	
Inducción permanente del personal de nuevo ingreso sobre los riesgos y exigencias a las que se encuentra expuesto en el servicio de medicina nuclear sin comercializar el riesgo.	
De acuerdo a los DCST	
Mantener al día los planes y programas de seguridad radiológica para evitar que los trabajadores del servicio manifiesten exceso de confianza al realizar su actividad laboral.	
Propiciar la intervención oportuna del médico nuclear, pues el trabajo de los técnicos radiólogos es realizado sin supervisión del especialista.	
De acuerdo a la CV	Norma a consultar
Mediciones periódicas de radiaciones ionizantes en el servicio de medicina nuclear.	1. NOM-012-STPS-2012. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes. 2. NOM-008-NUCL-2003. Control de la contaminación radiactiva. 3. Reglamento General de Seguridad radiológica. 4. Reglamento Federal de Seguridad e Higiene y Medio Ambiente de Trabajo (RFSHMAT), Título Tercero, Capítulo Segundo, Artículos 79 y 81.

Dar mantenimiento periódico a pisos y techos de las instalaciones.	NOM-001-STPS-2008. Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo. Condiciones de seguridad e higiene.
Mantener en orden y limpio el puesto de trabajo. Se deberá eliminar el almacenamiento de materiales que puedan resultar nocivos o peligrosos para la salud del POE; se debe contar con iluminación adecuada para la seguridad y conservación de la salud del trabajador.	RFSHMAT, Artículo 24, 25 y 28
Implementar sistemas contra incendio. Con esta acción se podrá evitar daños a las instalaciones y al medio ambiente o la pérdida de vidas humanas.	1. NOM-002-STPS-2010. Condiciones de seguridad-prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo. 2. RFSHMAT, Título Segundo, Capítulo Segundo, Artículos 26-28.
Implementación del programa de Seguridad e Higiene y de inducción y capacitación para los niveles directivos sobre salud ocupacional.	1. RFSHMAT, Título Cuarto, Capítulo Cuarto, Artículos 130-134 2. NOM-019-STPS-2011. Constitución, integración, organización y funcionamiento de las comisiones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.
Utilizar adecuadamente los colores de seguridad y contraste de la señalización, así como colocarlos en lugares visibles y de fácil acceso.	NOM-026-STPS-2008. Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.
Realización de exámenes periódicos a los trabajadores y registro de los historiales dosimétricos individuales.	NOM-026-NUCL-1999. Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.
Aislamiento del área de estudios de gammagrafía del personal médico y técnico. El espacio donde se ubicará el puesto de trabajo deberá tener los lineamientos normativos, de forma que permita el movimiento y el desplazamiento libre y evite la exposición innecesaria a las radiaciones ionizantes durante la aplicación del material radiactivo y la realización del estudio. Se recomienda que sea un espacio independiente.	1. NOM-003-NUCL-1994. Clasificación de instalaciones o laboratorios que utilizan fuentes abiertas. 2. NOM-027-NUCL-1996. Especificaciones para el diseño de las instalaciones radioactivas tipo II CLASE A, B y C.
Actualización de los procedimientos de seguridad y vigilancia radiológica	1. Reglamento General de Seguridad Radiológica 2. NOM-004-NUCL-1994. Clasificación de los desechos radioactivos. 3. NOM-005-NUCL-1994. Límites anuales de incorporación (LAI) y concentraciones derivadas en aire (CDA) de radionucleídos para el personal ocupacionalmente expuesto. 4. NOM-008-NUCL-2003. Control de la contaminación radiactiva. 5. NOM-013-NUCL-2009. Requerimientos de seguridad radiológica para regresar a

	pacientes a quienes se les ha administrado material radiactivo. 6. NOM-012-STPS-2012. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes.
Capacitación sobre seguridad radiológica al personal expuesto y vigilancia médica.	1. NOM-031-NUCL-1999. Requerimientos para la calificación y entrenamiento del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. 2. NOM-026-NUCL-1999. Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. 3. NOM-012-STPS-2012. 4. Reglamento General de Seguridad Radiológica. 5. RFSHMAT, Título Cuarto, Capítulo Cinco, Artículos 135-141.
Realización de diagnóstico de salud laboral e introducción de un programa de salud laboral o seguridad e higiene.	1. NOM-030-STPS-2009. Servicios preventivos de seguridad y salud en el trabajo. Funciones y actividades. 2. RFSHMAT, Título Cuarto, Capítulo Cinco, Artículos 135-141. 3. NOM-012-STPS-2012.
Implementación de equipo de protección personal específico para radiaciones ionizantes (collarín de plomo para tiroides, chaleco de plomo, entre otros), guantes de látex. Monitoreo con dosímetro individual y no ambiental como existe en el servicio.	1. NOM-017-STPS-2008. Equipo de protección personal. Selección, uso y manejo en los centros de trabajo. 2. RFSHMAT, Capítulo Noveno, Artículo 101. 3. NOM-012-STPS-2012.
Realizar verificaciones periódicamente para mejorar los porcentajes de eficacia; capacitar a los trabajadores; designar a un responsable en materia de salud laboral en procedimientos seguros de operación con la finalidad de disminuir accidentes y enfermedades de trabajo; y mejorar el medio ambiente laboral.	

Exigencia	Recomendación
Trabajo sedentario	Estudio ergonómico del puesto de trabajo. Implementación de un programa de gimnasia laboral. Promoción de la salud en temas como obesidad, alimentación, sedentarismo, entre otros.
Trabajo monótono	Introducción de programas de pausa laboral.

En primera instancia, este estudio nos permitió obtener datos y abrir camino para la investigación en este ramo, pues las evaluaciones de salud laboral en el ámbito hospitalario son escasas. Los datos encontrados nos permiten desarrollar un pensamiento crítico, es decir, emplear el conocimiento y la inteligencia para alcanzar, de forma efectiva, la posición más razonable y justificada sobre la salud en el trabajo y la importancia que posee para el beneficio de los trabajadores.

Como primera conclusión se plantea que el trabajo es, en esencia, la acción que el individuo realiza para dominar o transformar la naturaleza con el propósito de obtener la satisfacción de sus necesidades. Como consecuencia de su realización, se obtienen condiciones favorables y desfavorables, estas últimas se traducen en posibles riesgos y exigencias que derivan en la presencia de daños a la salud.

La adaptación del trabajo a la unidad socio-psico-somática es uno de los postulados fundamentales de la salud ocupacional, cuya prioridad consiste en promover y mantener un nivel óptimo de bienestar físico, mental y social para los trabajadores. Sin embargo, a partir de la revolución industrial, caracterizada por la aplicación de las ciencias humanas al trabajo, no siempre se garantizan las condiciones adecuadas de trabajo para preservar la salud del trabajador. Por otro lado, las nuevas exigencias, además, son cognitivas y emocionales, se presentan en el trabajador durante su jornada laboral como consecuencia de la división y organización del trabajo.

En cuanto al uso pacífico de materiales radiactivos, es importante enfatizar que la medicina, en especial la nuclear, es uno de los ámbitos más beneficiados con la utilización de radiaciones ionizantes. En ella se utilizan radiotrazadores o radiofármacos formados por un

fármaco transportador y un isótopo radiactivo. Estos radiofármacos se aplican dentro del organismo humano por diversas vías (la más recurrente es la intravenosa). Una vez que el radiofármaco está dentro del organismo, se distribuye por diversos órganos en función del tipo de radiofármaco empleado. La distribución del radiofármaco es detectada por un aparato detector de radiación llamado gammacámara y se almacena digitalmente, para después procesar la información de la cual se obtienen imágenes de todo el cuerpo o un órgano particular en estudio.

Estas imágenes, a diferencia de la mayoría de las obtenidas en radiología, son funcionales y moleculares, es decir, muestran el funcionamiento de los órganos y tejidos explorados para revelar alteraciones de los mismos a un nivel molecular.

Sin embargo, el empleo de radiaciones ionizantes conlleva riesgos para el hombre, por lo que su uso debe estar regido por medidas de protección, que aseguren un balance entre el beneficio y los riesgos a fin de eliminar estos últimos para el personal ocupacionalmente expuesto. Es necesario limitar los efectos de esta actividad, en particular, en el manejo de las fuentes radiactivas.

En su gran mayoría, los pacientes que acceden al servicio de medicina nuclear son ambulatorios, acuden, fundamentalmente, para diagnóstico y un porcentaje mucho menor, que en promedio podría representar el 15% de total de pacientes atendidos, acuden para tratamiento de enfermedades benignas o patologías malignas como el cáncer. El hecho de que los pacientes sean ambulatorios no los excluye de ser fuentes de exposición radiactiva para los trabajadores del servicio.

Se sabe que, en medicina nuclear, los efectos perjudiciales de la radiación ionizante sobre la salud del personal ocupacionalmente expuesto dependen del tipo de radiación, así como de la dosis y las condiciones de exposición. Para que la mayoría de esos efectos se produzcan son

necesarios niveles relativamente altos de exposición, así como omisión o transgresión de las normas específicas de protección contra este tipo de radiaciones.

Por ello, la detección precoz de determinados síntomas y signos, y la identificación de factores de riesgo concomitantes facilitan una adecuada y temprana intervención a fin de prevenir la aparición de ciertas patologías. Lo anterior también evita el agravamiento de enfermedades previamente existentes y posibilita la implementación de medidas de prevención para trabajadores ocupacionalmente expuestos.

A pesar de que el servicio de medicina nuclear evaluado utiliza tecnología avanzada en sus procesos de trabajo, los resultados arrojaron porcentajes de eficacia malos. En este caso es evidente el incumplimiento de la normatividad vigente en materia de salud laboral, pues se carece de medidas y equipo de protección personal básico, por lo cual es necesario establecer un programa de control con la finalidad de corregir las fallas encontradas y mejorar los porcentajes de eficacia.

Con respecto a la utilización de modelos de evaluación en salud laboral, como es el caso de PROVERIFICA, podemos decir que es de bajo costo y permite recopilar una gran cantidad de información; asimismo, ubicó con precisión las deficiencias normativas del servicio de medicina nuclear evaluado y facilitó la realización de propuestas de intervención, control y prevención de los riesgos y exigencias detectadas.

Es importante señalar que este tipo de modelos busca mejorar las condiciones de salud y seguridad de la empresa a partir de una política de salud ocupacional que incluya los objetivos clave que deben guiar a los equipos de trabajo para alcanzar resultados en materia de mejoramiento de las condiciones de trabajo y la satisfacción del personal.

Referencias Bibliográficas

- Alba, M., Claudis, A., Fernando, N. & Analía, S. (2006). Assessment of genotoxic damage in lymphocytes of hospital workers exposed to ionizing radiation in Argentina. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 61(2), 163-169.
- Almirall, P., Franco, G., Hernández, J., Portuondo, J., Hurtado, R. & Hernández, A. (2010). El modelo PROVERIFICA para el análisis del trabajo. Criterios de aplicación y validez. *Salud de los trabajadores*. 18(2), 117-127.
- Añez, E., Dávila, F., Gómez, W., Hernández, T., Reyes, I. & Talavera, J. (2010). *Manual para la elaboración de un análisis de situación de salud*. Maracay, Venezuela: IAES.
- Arámburu, X. (1996). *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos*. Tomo I, Cataluña, España: UPC.
- Betancourt, O. (2005). El monitoreo epidemiológico de la salud de los trabajadores. *La salud y el trabajo*, 5(3), 93-92.
- Rickards, J. (1986). *Las radiaciones: reto y realidades*. Distrito Federal, México: Fondo de Cultura Económica.
- Cherry, R. (2001). Radiaciones ionizantes. En: OIT (3ra ed.), *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. (pp. 48.2-48.6). Madrid.
- Ching-Ming, L. & Fang, M. (2004). Potential adverse health effects of low-level ionizing radiation exposure in a hospital setting. *Archives of Environmental Health*, 59(71), 342-347.
- Dobson, L. & Lindell, B. (1964). *Las radiaciones y la salud*. Ginebra, Suiza: Inswitzer
- Doll, R. (2005). Mortality of British Radiologist: A lecture Note. *Radiation Research*, 46(4), 123-129.
- Dublin, L. & Spiegelman, M. (1948). Mortality of medical specialists, 1938-1942. *JAMA*, 137(17), 1519-1524. doi:10.1001/jama.1948.02890510019005.
- Franco, G. (1998). *Verificación, diagnóstico y vigilancia de la salud en la empresa*. México: Serie Manuales, DCBS UAM- X.

- Franco, G. (2003). Un modelo holístico para la evaluación integral de las empresas. *Salud de los Trabajadores*, 11(2), 115-130.
- Franco, G. (2006). En busca de una definición de salud en el trabajo. En: *Cultura de la empresa y salud en el trabajo*. (Tesis doctoral no publicada). Escuela Nacional de Antropología e Historia, México.
- Fundación MAFRE. (1996). *Manual de Higiene Industrial*. Madrid, España: Autor.
- Galle, P. y Paulin, R., (2003). *Biofísica, radiobiología, radiopatología*. Madrid, España: Masson
- Gambini, J., Laurel, D., Causse, E. & Choudat, D. (2006). Occupational exposure to ionizing radiation in the health care establishment of assistance publique in Paris. *Occupational Health*, 40(4), 45-48.
- Gaona, E. & Franco, J. (2004). Occupational exposure to diagnostic radiology in workers without training in radiation safety. *Medical Physics*, 2(1), 179-181.
- Gaona, E. (1999). *Cáncer, Radiación y Seguridad Radiológica*. D.F., México: Edilibros.
- Gestal, O. (2001). *Riesgos de trabajo del personal sanitario*. Madrid, España: McGraw Hill.
- Gil, F. (2005). *Tratado de Medicina del Trabajo*. Barcelona, España: MASSON.
- Gordon, F. et al. (2009). Estado actual de la medicina nuclear. *Revista médica del IMSS*, 38(1), 53-56.
- Graef, A. (1996). Medicina Nuclear. *Revista de la Facultad de Medicina UNAM*, 39(1), 23-24.
- Hernández, J., Almirall, J. & Franco, G. (2005). Procedimiento para la verificación, diagnóstico y vigilancia de la salud laboral de la empresa. *Revista cubana Salud y Trabajo*, 6(1), 36-48.
- Hyun-Sul, L. (2010). Health disorders caused by physical factors among health care workers- focusing on ionizing radiation. *University College of Medicine*, 53(6), 483-491.
- Hurtado, J. (2005). Vocabulario de Economía Política. *Enciclopedia de Economía Universidad de Málaga*, (Vol.3, pp. 56-58). España: Sucesores de Manuel Soler editores.

- IMSS (Instituto Mexicano Del Seguro Social). (2002). Del catálogo de actividades para la clasificación de las empresas en el seguro de riesgos de trabajo. En: *Reglamento de la Ley del Seguro Social en materia de afiliación, clasificación de empresas, recaudación y fiscalización*. México: Diario Oficial de la Federación, segunda sección, 1 de noviembre de 2002, pp. 76-83.
- IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social). (2011). *Información de salud, estudios de medicina nuclear de enero a diciembre 2011*. Recuperado de: <http://www.imss.gob.mx/estadisticas/dis>.
- ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares). (1992). *Apuntes del curso de protección radiológica en medicina nuclear e investigación*. México: ININ.
- International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Vol.115. *IAEA (International Atomic Energy Agency)*. (1996).
- Jerzy, J., Kacorsyk, J., Tibor-Czerwinska, M., et al. (2006). Assessment of occupational exposure to photon rays in Poland, 2006. *Medycyna Pracy*, 58(4), 287-290.
- Lain, P. (1983) *Historia de la Medicina*. Barcelona, España: Salvat Editores.
- Leyton, F., Ubeda, C., Delgado, O., Espinoza, A., Díaz, J., Oyarzun, C. & Mansilla, S. (2007). Application of a radiometric inventory protocol in radiodiagnostics. *Revista Chilena de Radiología*, 13(16), 213-217.
- Marx, C. (1975). *El Capital*. D.F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Méndez, I., et al. (1990). *El protocolo de investigación. Lineamientos para su elaboración y análisis*. Distrito Federal, México: Trillas.
- Mírenla, S., Kivela, T. & Kurttió, P. (2011). Lens opacities among physicians occupationally exposed to ionizing radiation-a pilot study in Finland. *Environ Health*, 37(4), 237-243.
- Modelo para la Verificación, Diagnóstico y Vigilancia de la Salud Laboral en las Empresas, PROVERIFICA*. (s.f). Recuperado de: <http://www.proverifica.com/modelo.htm>
- Murty, P. (2005). Assessment of risk at workplace: A study on radiographers work practice. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 9(2), 26-28.
- Nicklason, L., Marx, V. & Chan, H. (1991). Interventional radiologist occupational radiation doses and risk. *Radiology*, 187, 729-733.

- Noriega, M., Franco, G., Garduño, M., León, L, et al. (2008). *Situación en México. Informe continental sobre la situación del Derecho a la Salud en el Trabajo*. México: UAM-X.
- Noriega, M., Franco, G., Martínez, S., Villegas, J., Alvear, G. & López, J. (2004). *Evaluación y seguimiento de la salud de los trabajadores*. México: UAM-X, Serie académicos CBS.
- Noriega, M. (1989). *En defensa de la salud en el trabajo*. México: SITUAM.
- Núñez, M. (2008). Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. *Comité de Tecnólogos de ALASBIMN*, 3, 345.
- Oliva, J. (2003). Situación actual y propuesta de desarrollo de la medicina nuclear. *Nucleus*, 33, 18-21.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2010). *Resumen del informe final de prácticas en el sector de la salud*. Comisión sobre Determinantes Sociales de la Salud. Recuperado de: <http://whqlibdoc.who.int/publications.pdf>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2008, 18 de Julio). *Informe del comité científico de las naciones unidas para el estudio de los efectos de las radiaciones atómicas*, UNSCEAR. Nueva York: Autor.
- Parveen, B., Preston, D., Doody, Hauptmann, M., Kampa, D., Alexander, B., Petibone, D., et al. (2007). Retrospective Biodosimetry among United Status Radiologic Technologist. *Radiat*, 167, 727-734.
- PE (Poder Ejecutivo Federal). (1917). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Título Sexto. Del trabajo y de la Previsión Social. Artículo 123. En: *Diario Oficial de la Federación*, 5 de febrero de 1917.
- Perkins, A. (1996). *Nuclear Medicine: Science y Safety*. Londres, Reino Unido: John Libbey & Co., Ltd.
- Povilas. V., Atkocius, V. & Samerdokiené, V. (2008). Occupational exposure of medical radiation workers in Lithuania, 1991-2003. *Act Medical Lituanic*, 14(3), 155-159.
- Rosenberg, M. (2001). *Diccionario de Administración y Finanzas*. Barcelona, España: Océano.
- Sabino, C. (2005). Diccionario de Economía y Finanzas. *Enciclopedia de Economía*. Málaga, España: Sucesores de Manuel Soler, editores.

- Sahina, A., Abdulgani, T., Sitki, O., Vedri, S., Erhan, V., et al. (2009). Evaluation of the genotoxic effects of chronic low-dose ionizing radiation exposure on nuclear medicine workers. *Nuclear Medicine*, 46(4), 45-47.
- Sánchez, M., Gaburo, J., Gian, M., et al. (2010). Social-demographic profile and dose evaluation of the radiopharmaceutical facility workers. *International Journal of low radiation*, 7(6), 200-203.
- Sánchez, N. (2011). *Medición de dosis recibida por el personal ocupacionalmente expuesto del departamento de medicina nuclear del INCAN*. (Tesis de licenciatura no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- SEGOB (Secretaría de Economía). (2009). *Estadísticas económicas*. México: SEGOB. Recuperado de: <http://www.se.gob.mx/estadísticas>
- SE (Secretaría de Energía). (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-003-NUCL-1994, Clasificación de instalaciones o laboratorios que utilizan fuentes abiertas. En: *Diario Oficial de la Federación*, 07 de febrero 1996.
- SE (Secretaría de Energía). (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-008-NUCL-2003, Control de contaminación radiactiva. En: *Diario Oficial de la Federación*, 29 de diciembre 2003.
- SE (Secretaría de Energía). (1999). Norma Oficial Mexicana NOM-026-NUCL-1999, Vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. En: *Diario Oficial de la Federación*, 05 de julio 1999.
- SE (Secretaría de Energía). (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-027-NUCL-1996, Especificaciones para el diseño de las instalaciones radiactivas Tipo II clase A,B y C. En: *Diario Oficial de la Federación*, 23 de septiembre 1997.
- SE (Secretaría de Energía). (1999). Norma Oficial Mexicana NOM-031-NUCL-1999, Requerimientos para la calificación y entrenamiento del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. En: *Diario Oficial de la Federación*, 28 de diciembre 1999.
- Segura, W. & Téllez, D. (2009). Riesgo de desarrollar cáncer de tiroides en radiólogos y tecnólogos de radiología con exposición ocupacional a radiación ionizante. *Revista Medica Sanitas*, 12, 42-48.

- Sharp, F., Gemmell, H. & Murray, A. (2005). *Practical Nuclear Medicine*. Londres, Reino Unido: Springer.
- Sujul, C. (2005). *Una propuesta metodológica para la evaluación integral de establecimientos que hacen uso de rayos X diagnóstico*. (Tesis de maestría no publicada). Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, México.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-002-STPS-2008, Condiciones de seguridad, prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo. En: *Diario Oficial de la Federación*, 24 de noviembre 2010.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2008). Norma Oficial Mexicana NOM-001-STPS-2010, Edificios, locales y áreas en los centros de trabajo, condiciones de seguridad. En: *Diario Oficial de la Federación*, 9 de diciembre 2008.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-012-STPS-2012, Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes. En: *Diario Oficial de la Federación*, 15 de junio 1994.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2008). Norma Oficial Mexicana NOM-017-STPS-2008, Equipo de protección personal, selección, uso y manejo en los centros de trabajo. En: *Diario Oficial de la Federación*, 9 de diciembre 2008.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2008). Norma Oficial Mexicana NOM-026-STPS-2008, Colores y señales de Seguridad e Higiene e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías. En: *Diario Oficial de la Federación*, 25 de noviembre 2008.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2009). Norma Oficial Mexicana NOM-030-STPS-2009. Servicios preventivos de seguridad y salud en el trabajo- funciones y actividades. En: *Diario Oficial de la Federación*, 22 de diciembre 2009.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2009). Norma Oficial Mexicana NOM-113-STPS-2009, Seguridad, calzado de protección, clasificación, especificaciones y métodos de prueba. En: *Diario Oficial de la Federación*, 22 de diciembre 2009.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (2009). Norma Oficial Mexicana NOM-115-STPS-2009, Seguridad, casco de protección, clasificación, especificaciones y métodos de prueba. En: *Diario Oficial de la Federación*, 22 de diciembre 2009.
- STPS (Secretaría del Trabajo y Previsión Social). (1997). Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo. En: *Diario Oficial de la Federación*, 21 de enero 1997.

- Tomasina, F., Laborde, A., Spontón, F., Blanco, D., Pintado, C., Stolovas, N. & Satragno, N. (2010). Vigilancia de la exposición a radiaciones ionizantes en el personal Universitario de Salud. *Revista Cubana de Salud Pública*, 36(1), 119-127.
- Torres, C. (2009). *Dosimetría termoluminiscente ambiental en área de aplicación de medicina nuclear*. (Tesis de licenciatura no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- Touya, E. (1987). La medicina nuclear en América Latina. *Boletín de la OIEA*, 1, 26-28.
- Trueba, A. & Trueba, J. (2010). *Ley Federal del Trabajo*. México: Porrúa.
- UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). (1994). *Diccionario Jurídico sobre Seguridad Social*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, México: ISBN.¹
- Veall, N. & Vetter, H. (1964). *Técnicas con radioisótopos para la investigación y el diagnóstico en clínica*. Buenos Aires, Argentina: Universitaria de Buenos Aires.
- Vega, M. (2001). La Reforma Laboral en América Latina, un análisis comparado, *Oficina OIT Regional para América Latina y el Caribe*, 12, 56-57.
- Vizuet, J. & Paredes, L. (2009). Radiología, Radioterapia y Medicina Nuclear: un siglo de progresos. *El ININ hoy*, 20(4), 4-6.
- Yoshinaga, S., Mabuchi, K. et al. (2004). Cancer risks among radiologists and radiologic technologists: Review of epidemiologic studies. *National Institute of Radiological Sciences*, 4(8), 4-9.