



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Física y Matemáticas

**Caracterización de desechos contaminados
con material radiactivo en medicina nuclear**

TESIS QUE PRESENTA:
Yesica Alvarez Rico

PARA OBTENER EL GRADO DE:
Licenciada en Física y Matemáticas

DIRECTORES:

Ing. Mario Mejía López

M. en C. Carlos Filio López

México D.F.

3 de febrero de 2010

Índice general

Agradecimientos	III
Introducción	IV
1. Origen y gestión de desechos radiactivos	1
1.1. Origen de los desechos radiactivos	1
1.2. Aplicaciones de la radiación ionizante a la medicina	3
1.2.1. Generación de residuos contaminados con material radiactivo en medicina nuclear [3]	7
1.3. Gestión de desechos radiactivos	9
1.4. Pasos de la gestión de desechos radiactivos [5]	15
1.4.1. Planeación	16
1.4.2. Caracterización	17
1.4.3. Transporte	17
1.4.4. Almacenamiento temporal	18
1.4.5. Tratamiento previo	19
1.4.6. Tratamiento	19
1.4.7. Acondicionamiento	20
1.4.8. Almacenamiento definitivo	20
1.5. Vías de gestión de residuos [6]	21
2. Dispensa de residuos contaminados con material radiactivo	24
2.1. Dispensa de residuos, descarga de efluentes y otros conceptos	24
2.1.1. Dispensa	25
2.1.2. Descarga	26
2.1.3. Exclusión y exención	26
2.2. Dispensa en medicina nuclear [3]	26

3. Clasificación y segregación de desechos radiactivos	29
3.1. Métodos de clasificación [2]	30
3.2. Clasificación en la normativa mexicana	34
4. Caracterización de residuos contaminados con material radiactivo	36
4.1. Métodos y técnicas de caracterización	37
4.1.1. Conocimiento del proceso	37
4.1.2. Caracterización radiológica no destructiva [11]	37
4.1.3. Caracterización radiológica destructiva	39
4.2. Caracterización de residuos en la normativa mexicana	42
4.3. Caracterización de residuos generados en medicina nuclear	44
4.3.1. Criterios de clasificación para los grupos de técnicas [6]	44
4.3.2. Métodos de medición en medicina nuclear	47
5. Metodología para la caracterización radiológica.	49
5.1. Procedimiento general para el estudio de una técnica.	49
5.2. Procedimiento general para el estudio de un grupo de técnicas	52
Conclusiones.	55
Glosario.	57
Bibliografía.	60

Agradecimientos

Quiero agradecer a la C.N.S.N.S., en particular a mis asesores y a la S.N.M. por todo el apoyo brindado durante la realización de esta tesis. También quiero agradecer a mis padres por su paciencia y apoyo a lo largo de mis estudios.

Introducción

El objetivo de esta tesis es presentar una metodología de caracterización de residuos radiactivos provenientes del área de medicina nuclear en México, tomando en cuenta el procedimiento seguido para la utilización de radioisótopos y en particular los distintos pasos de dicho procedimiento que originan residuos contaminados. Esto permitirá contar con mejores elementos para la toma de decisiones en la gestión de desechos radiactivos, posibilitando la dispensa inmediata del residuo o proporcionando un cálculo adecuado del tiempo requerido en almacenamiento para su dispensa posterior.

Ya que se espera que este trabajo sea de apoyo tanto para usuarios de material radiactivo como para el regulador en la materia y con la finalidad de que exista una coherencia con la normativa mexicana los conceptos utilizados a lo largo del trabajo son definidos conforme a los reglamentos y normas vigentes en el país.

En el primer capítulo se presentan las diferentes actividades que originan los desechos radiactivos, haciendo énfasis en la medicina nuclear, además de esto se presentan las distintas alternativas y actividades a seguir para el manejo de estos desechos. En el segundo capítulo se presenta el concepto de dispensa, así como otros conceptos relacionados a la liberación de material radiactivo de control regulador nuclear. En el tercer capítulo se presentan los métodos y sistemas de clasificación de desechos radiactivos recomendados por el OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica, o por sus siglas en inglés IAEA) y lo establecido en la normativa mexicana. En el cuarto capítulo se mencionan los distintos métodos de caracterización de residuos radiactivos sin tomar en consideración la actividad específica en que hayan sido generados, así como los distintos equipos detectores existentes en un servicio de medicina nuclear y los distintos residuos que pueden ser medidos en cada equipo. Por último, el quinto capítulo es en el que se presenta la metodología propuesta en esta tesis.

Capítulo 1

Origen y gestión de desechos radiactivos

Los desechos radiactivos son aquellos materiales sin uso previsto y que contienen o están contaminados con radionúclidos con concentraciones o niveles de radiactividad mayores a los establecidos por el órgano regulador en materia nuclear [1], que en el caso de México es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias C.N.S.N.S.

1.1. Origen de los desechos radiactivos

En la actualidad la energía nuclear tiene muchas aplicaciones, tales como la producción de energía eléctrica en centrales nucleares, el diagnóstico y tratamiento de enfermedades (medicina nuclear y radioterapia) en hospitales, esterilización de materiales, control de plagas, propulsión de submarinos, etc. Sin embargo, estas actividades, al igual que muchas otras actividades humanas traen consigo la generación de residuos, que pueden tener forma líquida, sólida o gaseosa, algunos de los cuales son considerados desechos radiactivos.

A continuación se mencionan algunos de los principales desechos radiactivos y las actividades que los producen [2].

- Minería y molienda: Los desechos resultantes de la producción de uranio, tienen pequeñas cantidades de uranio y están contaminados principalmente por torio, radio y radón.

- Suministro de combustible: Los desechos resultantes de la purificación, conversión y enriquecimiento de uranio para la fabricación de elementos combustibles, incluyen basura ligeramente contaminada y residuos de operaciones de reciclamiento, contienen generalmente uranio y en el caso de combustible MOX también contienen plutonio.
- Operación de reactores: Los desechos resultantes del tratamiento de agua de enfriamiento, la descontaminación de equipos y el mantenimiento rutinario, incluyendo recargas de combustible, incluye ropa contaminada, trapeadores, papel y concreto, resinas y filtros gastados contaminados con material radiactivo, estos desechos también pueden ser generados al reemplazar los elementos activados, como barras de control y componentes localizados en el núcleo del reactor y equipos o componentes de la instalación que resultan contaminados como parte del proceso.
- Manejo de combustible gastado: El combustible gastado contiene uranio, productos de fisión y actínidos y genera una cantidad significativa de calor cuando es removido del núcleo y puede ser considerado un desecho o ser reprocesado, en cuyo caso se generan desechos en su reprocesamiento, que pueden contener productos de activación, productos de fisión, uranio y plutonio. La corriente principal de desechos líquidos durante el reprocesamiento son soluciones de ácido nítrico, que contienen productos de fisión de alta actividad y actínidos en altas concentraciones.
- Actividades de investigación: El tipo y volumen del desecho depende del tipo de investigación que se lleve a cabo y abarca reactores nucleares de investigación, aceleradores y laboratorios.
- Producción de radioisótopos: El tipo y volumen del desecho radiactivo generado dependen del radioisótopo y su proceso de producción, generalmente el volumen es pequeño, aunque las actividades específicas pueden ser significativas.
- Aplicación de radioisótopos: El uso de isótopos radiactivos puede producir pequeños volúmenes de desechos radiactivos, el tipo y volumen dependen de la aplicación.

Otra forma de generación de desechos radiactivos es la limpieza de lugares afectados por la existencia de éstos o por accidentes o por las actividades

relacionadas al cese de operaciones de una instalación radiactiva o nuclear. También se ha reconocido que otras actividades industriales no relacionadas al área nuclear pueden generar desechos radiactivos, tal es el caso del procesamiento a gran escala de materiales que contengan radionúclidos naturales (NORM por sus siglas en inglés Naturally Occurring Radioactive Material), por ejemplo la producción de fertilizantes artificiales o la extracción de gas o petróleo. En este caso los radionúclidos presentes en bajas concentraciones en el material se concentran durante el procesamiento y se encuentran ya sea en el producto o en las diferentes corrientes de desechos generadas en el proceso.

Estos desechos requieren de una gestión adecuada, de tal forma que se proteja la salud del hombre y el medio ambiente en el presente y en el futuro, sin imponer una carga a las generaciones futuras.

1.2. Aplicaciones de la radiación ionizante a la medicina

Desde el descubrimiento de los rayos X en 1896 [I] las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la medicina han ido aumentando y a pesar de la existencia de otros procedimientos que no incluyen el uso de radiaciones ionizantes, el uso de fuentes abiertas y selladas continúa aumentando. De acuerdo con información proporcionada por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, en la actualidad, en nuestro país el 89 % de la demanda de radioisótopos es en la rama de la medicina, en donde existen una gran cantidad de aplicaciones.

La radioterapia se utiliza para el tratamiento de ciertas enfermedades, en particular para el cáncer y existen dos tipos de tratamiento: la teleterapia, en la cual la fuente radiactiva no entra en contacto con el paciente. Una fuente usual para la teleterapia es el ^{60}Co y también se utilizan comúnmente los aceleradores de partículas, que proporcionan haces monoenergéticos de neutrones, electrones o iones pesados. El otro tipo de radioterapia es la braquiterapia, en este caso, la fuente radiactiva en forma de alambre, cápsula o semilla es insertada en el tumor, lo cual permite dar una mayor dosis al tumor, con menor daño a los tejidos sanos que lo rodean.

Otra aplicación de la energía nuclear en este ámbito es la esterilización de material quirúrgico como batas quirúrgicas, suturas, catéteres, jeringas,

etc., para la esterilización de tejidos para injertos de huesos y nervios y para la esterilización de tejidos para el tratamiento de quemaduras.

La medicina nuclear consiste en la utilización de pequeñas cantidades de material radiactivo para obtener distintos beneficios, entre los que figuran analizar el funcionamiento de órganos o tejidos, para la selección del tratamiento adecuado, la vigilancia del progreso de una enfermedad o de los efectos del tratamiento, la confirmación del diagnóstico del paciente y algunos tratamientos.

Existen dos tipos de medicina nuclear. La medicina nuclear in vivo, en la que un radiofármaco es suministrado al paciente, usualmente por vía intravenosa, para analizar una función fisiológica o bioquímica del organismo. A diferencia de los rayos X, en la medicina nuclear se pueden estudiar órganos, tejidos y las articulaciones, además de la estructura ósea y también se pueden obtener imágenes funcionales, es decir, se puede ver al órgano funcionando. En la medicina nuclear in vitro se extrae un fluido del cuerpo del paciente, por ejemplo, la sangre, y posteriormente en un laboratorio, se detectan y miden ciertos componentes químicos; es de 10 a 100 millones de veces más sensible que otros estudios, lo cual hace posible la detección temprana de alteraciones neurológicas importantes, por ejemplo, el hipotiroidismo en niños aparentemente sanos.

Entre los estudios más comunes de medicina nuclear se cuentan [II]:

- Gammagrafía renal: se utiliza para examinar los riñones y detectar cualquier anomalía.
- Estudio de tiroides.
- Centellograma óseo: se utiliza para evaluar cualquier cambio degenerativo o artrítico en las articulaciones, para detectar enfermedades y tumores de los huesos, o para determinar la causa del dolor o inflamación de los huesos.
- Gammagrafía con galio: se utiliza para diagnosticar enfermedades inflamatorias o infecciosas activas, tumores y abscesos.
- Escáner de corazón: se utiliza para identificar el flujo sanguíneo anormal al corazón, para determinar la extensión de los daños sufridos por el músculo cardíaco después de un infarto y para evaluar la función cardíaca.

- Tomografía cerebral: se utiliza para investigar problemas en la circulación de sangre al cerebro.
- Mamografía: se utiliza para localizar tejido canceroso en el seno.
- Tratamiento de cáncer de tiroides con ^{131}I .
- Tratamiento de dolor metastásico con ^{153}Sm .

Además es importante mencionar los radionúclidos utilizados en esta área, los cuales son mostrados en la tabla 1 [3].

Núclido	Aplicación	Cantidad por aplicación	Características del desecho
^3H	radiotrazado mediciones clínicas	hasta 50 GBq	solventes, sólidos líquidos
^{13}N	PET*	hasta 2 GBq	sólidos, líquidos
^{11}C	PET	hasta 2 GBq	sólidos, líquidos
^{14}C	radiotrazado diagnóstico	hasta 50 GBq menos de 1 MBq	solventes gaseosos (CO_2 exhalado)
^{15}O	PET	hasta 500 MBq	sólidos, líquidos
^{18}F	PET	hasta 500 MBq	sólidos, líquidos
^{22}Na	diagnóstico	hasta 1 MBq	sólidos, líquidos
^{32}P	terapia	hasta 200 MBq	sólidos, líquidos
^{38}K	PET	hasta 1 GBq	sólidos, líquidos
^{42}K	mediciones clínicas	hasta 5 MBq	sólidos, líquidos
^{43}K	mediciones clínicas	hasta 5 MBq	sólidos, líquidos
^{45}Ca	diagnóstico	hasta 100 MBq	sólidos, líquidos
^{51}Cr	mediciones clínicas	hasta 5 MBq	sólidos
^{57}Co	mediciones clínicas	hasta 50 MBq	sólidos, líquidos
^{59}Fe	mediciones clínicas	hasta 50 MBq	sólidos, efluentes líquidos
^{67}Ga	mediciones clínicas	hasta 200 GBq	sólidos, efluentes líquidos
^{68}Ga	PET	hasta 2 GBq	sólidos, líquidos
^{67}Cu	terapia	hasta 1 GBq	sólidos, líquidos
^{75}Se	mediciones clínicas	hasta 10 MBq	sólidos, líquidos
^{75}Br	diagnóstico	-	sólidos, líquidos

Tabla 1: Radionúclidos utilizados en medicina nuclear

Núclido	Aplicación	Cantidad por aplicación	Características del desecho
⁷⁶ Br	diagnóstico	-	sólidos, líquidos
⁷⁷ Br	mediciones clínicas	hasta 5 MBq	sólidos, líquidos
^{81m} Kr	estudios de pulmón	hasta 6 GBq	gaseosos
⁸² Rb	PET	-	sólidos, líquidos
^{82m} Rb	mediciones clínicas	-	sólidos, líquidos
⁸⁵ Sr	diagnóstico	hasta 50 MBq	sólidos, líquidos
⁸⁹ Sr	terapia	hasta 300 MBq	sólidos, líquidos
⁹⁰ Y	terapia	hasta 300 MBq	sólidos, líquidos
^{99m} Tc	mediciones clínicas	hasta 100 GBq	sólidos, líquidos
¹¹¹ In	mediciones clínicas	hasta 50 MBq	sólidos, líquidos
^{113m} In	estudios in vivo	-	-
¹²⁴ I	diagnóstico	-	sólidos, líquidos ocasionalmente vapor
¹²⁵ I	mediciones clínicas	-	sólidos, líquidos ocasionalmente vapor
¹³¹ I	terapia	hasta 11.1 GBq	sólidos, líquidos ocasionalmente vapor
¹³² I	estudios in vivo	-	-
^{117m} Sn	terapia	-	-
¹²⁷ Xe	diagnóstico	hasta 200 MBq	gaseosos, sólidos
¹³³ Xe	mediciones clínicas	hasta 400 MBq	gaseosos, sólidos
¹⁴⁵ Sm	terapia	-	-
¹⁵³ Sm	terapia	hasta 8 GBq	sólidos, líquidos
¹⁶⁹ Er	terapia, paliativo	hasta 500 MBq	sólidos, líquidos
¹⁸⁶ Re	terapia, paliativo	hasta 500 MBq	sólidos, líquidos
¹⁸⁸ Re	terapia	hasta 500 MBq	sólidos, líquidos
¹⁹⁸ Au	mediciones clínicas terapia	hasta 500 MBq	sólidos, líquidos
²⁰¹ Tl	mediciones clínicas	hasta 200 MBq	sólidos, líquidos
¹⁹⁷ Hg	estudios in vivo	-	-

Tabla 1 (cont.): Radionúclidos utilizados en medicina nuclear

*PET es tomografía por emisión de positrones y recibe este nombre por sus siglas en inglés “Positron Emission Tomography”, es una técnica in vivo que sirve para detectar cáncer, determinar el flujo de sangre al corazón, determinar los efectos de un ataque al corazón, evaluar anormalidades cerebrales, entre otras cosas.

1.2.1. Generación de residuos contaminados con material radiactivo en medicina nuclear [3]

El uso de materiales radiactivos en la medicina es muy amplio, como consecuencia de este uso se produce un amplio rango de desechos radiactivos, que dependen de la aplicación y de los radionúclidos utilizados. Los desechos generados durante la aplicación de los radioisótopos en la medicina o la investigación biológica son considerados como desechos radiactivos biomédicos.

Ya que el enfoque de este trabajo está dirigido a la medicina nuclear, se dará especial atención a aquellos desechos provenientes del uso de fuentes radiactivas abiertas en la medicina. En muchas ocasiones estos desechos pueden contener un componente biológico infeccioso y también se incluyen como desechos las fuentes abiertas excedentes, así como desechos anatómicos, como son partes del cuerpo, tejidos, órganos y fluidos. Los desechos secundarios mixtos son aquellos que pueden haber entrado en contacto con los humanos y que pueden estar contaminados con radioisótopos, además de poseer otro peligro, biológico-infeccioso, químico, físico o inflamable-explosivo.

Los peligros físicos incluyen la posibilidad de cortaduras, punciones y heridas resultantes del manejo manual de objetos pesados. Los peligros químicos incluyen potenciales reacciones químicas adversas, o heridas causadas por la presencia de ácidos, alcalinos, oxidantes o materia orgánica oxidable y pueden ser ocasionados por la mezcla de desechos incompatibles. Los peligros biológico-infecciosos vienen por los desechos contaminados con sangre, cualquier otro fluido corporal o cualquier otro material potencialmente infeccioso, además de restos patológicos y carcasas de animales. Los peligros inflamables-explosivos pueden darse al almacenar centelleadores orgánicos de bajo punto de ignición (menor a 21°C).

Al igual que en las demás aplicaciones de los radioisótopos, antes de su utilización se debe diseñar la instalación, para garantizar el uso seguro del material, incluyendo la planeación del procesamiento, almacenamiento y disposición de todos los desechos radiactivos generados y debe también

planearse la utilización, de forma que se minimicen tanto la dosis como la generación de desechos radiactivos.

A continuación se mencionan algunos de los tipos de desechos radiactivos que pueden presentarse en medicina nuclear:

- Soluciones excedentes de radionúclidos, que se espera sean estériles.
- Soluciones acuosas con bajos niveles de radionúclidos, por ejemplo, del lavado de aparatos.
- Soluciones orgánicas, que pueden o no ser miscibles con el agua, por ejemplo, residuos de líquidos de centelleo y residuos de síntesis orgánica.
- Excreciones de pacientes administrados con radionúclidos.
- Desechos anatómicos, por ejemplo, partes del cuerpo, tejidos, órganos y fluidos.
- Soluciones radiactivas gastadas.
- Desechos sólidos, semi-sólidos y húmedos que pueden o no tener las condiciones adecuadas para su disposición en un relleno sanitario o su combustión, es decir, toallas de incontinencia con excreciones, líquidos absorbidos.
- Resinas, geles y platos de cromatografía provenientes de diagnóstico médico e investigación.
- Desechos de comida de pacientes administrados con radionúclidos para propósitos terapéuticos.
- Desechos sólidos y secos, apropiados para la compactación, combustión o trituración.
- Desechos que representan peligro de punción, por ejemplo, agujas, vidrios rotos, etc.
- Desechos provenientes de derrames y de procesos de descontaminación y clausura de instalaciones, por ejemplo, tejidos, trapos, etc.
- Desechos secundarios, es decir, materiales que puedan haber entrado en contacto con animales o humanos.

En esta área los desechos gaseosos son ocasionados por el uso de ^{133}Xe y $^{81\text{m}}\text{Kr}$ en imágenes para diagnóstico de ventilación del pulmón. Ya que se trata de gases nobles, es difícil su tratamiento y usualmente son liberados a la atmósfera. Es esencial asegurar que no haya posibilidad de reingreso de estos gases al edificio.

Los desechos sólidos son papeles, plásticos, carcasas de animales, materiales contaminados, contenedores radiofarmacéuticos desechados, vendajes, equipo contaminado, órganos y tejidos. Estos desechos usualmente se separan en combustibles y no combustibles y en compactables y no compactables. Por lo general, estos contienen un nivel de actividad relativamente baja en comparación con los desechos líquidos. En estos desechos se incluyen hojas y bolsas plásticas, ropa de protección, guantes, mascararas, filtros, cubrezapatos, toallas de papel, toallas, herramientas de metal y vidrio y equipo desechado.

Los desechos líquidos incluyen agua contaminada, efluentes, desechos provenientes de procesamientos químicos y soluciones descontaminantes, solventes, sangre o fluidos corporales, líquidos radiofarmacéuticos desechados, descargas orales o por heridas, orina, agentes de quimioterapia, pequeñas cantidades de aceites contaminados y fluidos de centelleo. Si el desecho también representa algún peligro no radiológico, nos referimos a él como desecho mixto.

1.3. Gestión de desechos radiactivos

Entiéndase por gestión de desechos radiactivos a todas las actividades administrativas y operacionales necesarias para la manipulación, tratamiento previo, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento temporal y almacenamiento definitivo de los desechos radiactivos de una instalación nuclear o radiactiva, incluyendo el transporte. Su objetivo es obrar de tal forma que se protejan la salud humana y el medio ambiente ahora y en el futuro, sin imponer una carga indebida a las generaciones futuras, este objetivo debe ser alcanzado sin restringir indebidamente la explotación de las instalaciones o la realización de actividades que utilicen material radiactivo o generadores de radiación, para alcanzar esto es necesario controlar la exposición de las personas a la radiación y la liberación de material radiactivo al ambiente, disminuir la probabilidad de eventos que lleven a la pérdida de control de la fuente y mitigar las consecuencias de dichos eventos cuando sucedan. El OIEA publicó 10 principios básicos de seguridad para instalaciones radiacti-

vas y nucleares, los que a continuación se describen [4]:

1. **Responsabilidad de la seguridad.** “La responsabilidad primordial de la seguridad debe recaer en la persona u organización a cargo de las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones”.
2. **Función del gobierno.** “Debe establecerse y mantenerse un marco de seguridad jurídico y gubernamental eficaz, que incluya un órgano regulador independiente.”
3. **Liderazgo y gestión en pro de la seguridad.** “Deben establecerse y mantenerse un liderazgo y una gestión que promuevan eficazmente la seguridad en las organizaciones que se ocupan de los riesgos asociados a las radiaciones, y en las instalaciones y actividades que los generan.”
4. **Justificación de las actividades e instalaciones.** “Las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones deben reportar un beneficio general.”
5. **Optimización de la protección.** “La protección debe optimizarse para proporcionar el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar.”
6. **Limitación de los riesgos para las personas.** “Las medidas de control de los riesgos asociados a las radiaciones deben garantizar que ninguna persona se vea expuesta a un riesgo de daños inaceptable.”
7. **Protección de las generaciones presentes y futuras.** “Deben protegerse contra los riesgos asociados a las radiaciones las personas y el medio ambiente del presente y del futuro.”
8. **Prevención de accidentes.** “Deben desplegarse todos los esfuerzos posibles para prevenir los accidentes nucleares o radiológicos y para mitigar sus consecuencias.”
9. **Preparación y respuesta en casos de emergencia.** “Deben adoptarse disposiciones de preparación y respuesta para casos de incidentes nucleares o radiológicos.”

10. **Medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados.** “Las medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados deben justificarse y optimizarse”.

Estos principios, publicados en 2007 son una generalización de 3 documentos publicados en años anteriores a 2007 por el OIEA (“Seguridad de las Instalaciones Nucleares”. Colección de seguridad 110-F, IAEA-1993; “Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources”. Colección de seguridad 120, IAEA-1996; “Principios para la Gestión de Desechos Radiactivos”. Colección de seguridad 111-F, IAEA-1994), estos son referentes a la seguridad de instalaciones nucleares, radiactivas y de gestión de desechos respectivamente, ampliándose adicionalmente el alcance al transporte de materiales radiactivos. En el caso de los desechos radiactivos el documento publicado en 1994 contiene 9 principios básicos para la gestión segura de los desechos radiactivos y que a continuación se reproducen ya que en los 10 principios antes referidos algunos de ellos no son fácilmente visibles y que se considera es importante tenerlos en cuenta al momento de establecer un sistema de gestión de desechos radiactivos a nivel nacional (políticas y estrategias) [5]:

1. **Protección de la salud humana.** “La gestión de desechos radiactivos deberá efectuarse de tal forma que se garantice un nivel aceptable de protección de la salud humana”.
 - Es preciso prestar especial atención a las diversas formas de evitar la exposición del hombre a las radiaciones y velar porque ésta se ajuste a las exigencias nacionales establecidas.
 - La planificación de la gestión segura de desechos radiactivos debe tener en cuenta los beneficios y la posibilidad de que las exposiciones afecten a distintas generaciones de seres humanos, los largos períodos que dan lugar a mayores incertidumbres en los resultados de las evaluaciones de seguridad, así como la capacidad de desintegración de los radionúclidos.
2. **Protección del medio ambiente.** “La gestión de desechos radiactivos deberá efectuarse de tal manera que ofrezca un nivel aceptable de protección del medio ambiente”.

- Se deben mantener lo más bajas posible las liberaciones provenientes de los diversos procesos de gestión de desechos radiactivos. Dentro de límites autorizados, está permitida la liberación de sustancias radiactivas en aire, agua y suelo, y también la reutilización de los materiales.
- El almacenamiento definitivo de desechos radiactivos puede tener efectos adversos a largo plazo para la disponibilidad o utilización en el futuro de los recursos naturales, por tanto, la gestión de desechos radiactivos debe llevarse a cabo de manera que limite en la medida de lo posible estos efectos.
- Las actividades de gestión de desechos radiactivos pueden tener repercusiones no radiológicas en el medio ambiente, de ahí la necesidad de que en la gestión de desechos radiactivos se alcance un nivel de protección ambiental al menos tan satisfactorio como el requerido en las actividades industriales de índole similar.

3. Protección fuera de las fronteras nacionales. “La gestión de desechos radiactivos deberá efectuarse de forma que dé la seguridad de que se tengan en cuenta los posibles efectos sobre la salud humana y el medio ambiente fuera de las fronteras nacionales”.

- A todo país incumbe la obligación de actuar de manera responsable, y, como mínimo, no imponer a la salud de los habitantes y al medio ambiente de otros países efectos más perjudiciales que los que se han considerado aceptables dentro de sus propias fronteras.

4. Protección de las generaciones futuras. “La gestión de desechos radiactivos deberá efectuarse de tal forma que las repercusiones previstas para la salud de las generaciones futuras no sean mayores que las que sean aceptables actualmente”.

- Aunque no es posible garantizar el total aislamiento de los desechos radiactivos durante períodos de tiempo prolongados, lo que se pretende es lograr una garantía razonable de que no se produzcan efectos inaceptables para la salud humana. Así mismo debe tenerse en cuenta la posible exploración o explotación en el futuro de recursos materiales valiosos con efectos potenciales adversos en la capacidad de aislamiento de una instalación de almacenamiento

definitivo. En la gestión de desechos radiactivos, y sobre todo en su almacenamiento definitivo, deben tomarse en consideración las incertidumbres que plantea la evaluación de la seguridad a largo plazo, dadas las dificultades que entraña pronosticar los efectos en un futuro lejano.

5. **Cargas impuestas a las generaciones futuras.** “La gestión de desechos radiactivos deberá efectuarse de tal forma que no imponga cargas indebidas a las generaciones futuras”.

- Las generaciones que reciben los beneficios de una práctica deben asumir la responsabilidad de gestionar los desechos resultantes. Es posible que un número limitado de medidas se transmitan a las generaciones posteriores, por ejemplo, la continuación del control institucional sobre una instalación de almacenamiento definitivo.
- Es responsabilidad de la generación actual desarrollar la tecnología, construir instalaciones y explotarlas, establecer un sistema de financiación, suficientes controles y planes para la gestión de los desechos radiactivos.
- En la medida de lo posible, la gestión de desechos radiactivos no debe basarse en disposiciones o medidas institucionales a largo plazo como característica de seguridad indispensable. La identidad, ubicación e inventario de una instalación de almacenamiento definitivo de desechos radiactivos deben registrarse debidamente y los registros deben mantenerse.

6. **Marco jurídico nacional.** “La gestión de desechos radiactivos deberá efectuarse dentro de un marco jurídico nacional apropiado que defina claramente las responsabilidades y establezca funciones reglamentadoras independientes”.

- Los países en que se producen o utilizan radionúclidos deben elaborar un marco jurídico nacional en que se estipulen leyes, reglamentos y directrices para la gestión de desechos radiactivos y se tengan en cuenta todas las estrategias de gestión de desechos radiactivos nacionales. Las responsabilidades de cada parte u organización participante deben definirse claramente en relación con todas las

actividades de gestión de desechos radiactivos que tengan lugar en un país.

- Es preciso separar la función reglamentadora de la función operacional. El marco jurídico debe especificar la forma de lograr la separación de las funciones.
- Es preciso tomar debidamente en cuenta las actividades actuales y futuras. Se deben adoptar las disposiciones necesarias para garantizar la continuidad de las responsabilidades y de la satisfacción de las necesidades de financiación durante un período suficientemente prolongado.

7. **Control de la producción de desechos radiactivos.** “La producción de desechos radiactivos deberá mantenerse al nivel más bajo posible”.

- La producción de desechos radiactivos se mantendrá al nivel más bajo posible, tanto en términos de actividad como de volumen, mediante la adopción de medidas de diseño y prácticas de explotación y cese de operaciones apropiadas. Esto incluye la selección y control de los materiales, reciclado, reutilización de materiales y la aplicación de procedimientos de explotación adecuados. Se debe prestar especial atención a la segregación de distintos tipos de desechos y materiales para reducir el volumen y facilitar la gestión.

8. **Dependencia recíproca entre la producción y la gestión de desechos radiactivos.** “Se deberá tener debidamente en cuenta la dependencia recíproca entre todas las etapas de la producción y la gestión de desechos radiactivos”.

- Todas las etapas de la gestión de desechos radiactivos están unidas por una relación de dependencia recíproca. Las decisiones que se adopten en el curso de una etapa pueden excluir ciertas alternativas en una etapa ulterior o afectarla. Además existen relaciones entre las etapas y las actividades de gestión que producen desechos o materiales radiactivos aptos para ser reciclados o reutilizados. Es conveniente que las personas encargadas de una etapa concreta de gestión de desechos o de una actividad que produzca desechos tengan adecuada conciencia de sus interacciones y relaciones, de

modo que se logre un equilibrio entre la seguridad y la eficacia de la gestión de desechos radiactivos. Deben evitarse exigencias contradictorias que puedan poner en peligro la seguridad operacional a largo plazo.

- En la práctica hay muchas situaciones que reclaman la adopción de decisiones antes de que se definan todas las actividades de gestión de desechos radiactivos. En el momento de considerar cualquiera de estas actividades, deben tenerse en cuenta, en la medida de lo posible, los efectos de las futuras actividades de gestión de desechos radiactivos, en particular el almacenamiento definitivo.

9. **Seguridad de las instalaciones.** “Durante la vida de las instalaciones de gestión de desechos radiactivos deberá velarse adecuadamente por su seguridad”.

- Durante la selección del emplazamiento, el diseño, la construcción, la puesta en servicio, la explotación y la clausura de una instalación debe otorgarse prioridad a las cuestiones de seguridad como la prevención de accidentes y la limitación de las consecuencias en caso de accidente. En este proceso, es característico prestar atención a las cuestiones de interés público.
- Durante toda la vida útil de las instalaciones de gestión de desechos radiactivos debe mantenerse un nivel apropiado de garantía de calidad y velarse también por una adecuada capacitación y calificación del personal.
- Deben realizarse estudios apropiados para evaluar la seguridad y las repercusiones de las instalaciones en el medio ambiente.

Es importante señalar que en las normas de seguridad del OIEA se parte del supuesto de que no existe un umbral en la dosis de radiación por debajo del cual no se incurra en ningún riesgo.

1.4. Pasos de la gestión de desechos radiactivos [5]

Los pasos para una gestión eficaz de los residuos radiactivos forman parte de un sistema global que abarca desde la planeación y producción hasta su

liberación como un residuo convencional o almacenamiento definitivo como un desecho radiactivo. Ya que las decisiones tomadas en una etapa pueden excluir o afectar ciertas alternativas en otra etapa, se debe tomar en cuenta la dependencia recíproca entre todas ellas, siendo el generador de los residuos radiactivos un elemento importante y que dará la pauta para una eficiente o ineficiente gestión de los desechos radiactivos. Con base en lo antes expuesto se puede concluir que la gestión de los desechos radiactivos se inicia desde la planeación del uso de material radiactivo por parte de los generadores, quienes deben realizar los esfuerzos necesarios para llevar la generación de los desechos radiactivos al mínimo posible, dentro de estos esfuerzos también deben tenerse en cuenta a las mismas instalaciones ya que puede existir el riesgo de que éstas se contaminen con material radiactivo, lo que conllevará a la generación, en su momento, de residuos y desechos radiactivos secundarios, por lo que también es importante que durante el diseño de las instalaciones se hagan previsiones en el diseño que permitan llevar la generación de los residuos y desechos radiactivos al mínimo posible tanto en la operación como en la clausura o cese de operaciones.

Todas las instalaciones, tanto de los generadores de residuos y desechos radiactivos como de los gestores de los mismos, serán objeto de evaluaciones sobre sus repercusiones en la seguridad y el medio ambiente, con la intención de demostrar que cumplen con los requisitos de seguridad establecidos por el órgano regulador y abarcarán condiciones de operación normal y de accidente o incidente que puedan preverse, se deberá demostrar que se han tomado medidas adecuadas para evitar accidentes e incidentes y que en caso de que ocurrieran las consecuencias serán mitigadas adecuadamente.

Como parte de la minimización de los desechos radiactivos es importante su segregación inmediata, evitando hasta donde sea posible, la contaminación de materiales no radiactivos, y así la necesidad de someter dichos materiales a descontaminación o control regulador.

1.4.1. Planeación

Antes de iniciar un trabajo en el que se utilice material radiactivo, es necesario realizar una planeación, en la que se consideren los factores que pueden contribuir a la generación innecesaria de residuos y desechos radiactivos a fin de atenderlos para minimizar la generación de los mismos, como son la utilización de una mayor cantidad de material radiactivo del necesario, aplicación de procedimientos ineficientes durante la utilización del material

radiactivo que conlleven a la generación de una mayor cantidad de residuos radiactivos, entre otras.

En esta etapa se debe elaborar el plan para la gestión de los desechos radiactivos, que incluya aquellos generados durante la actividad y también los generados por el tratamiento y acondicionamiento subsecuentes de estos desechos.

1.4.2. Caracterización

La caracterización de un residuo consiste en la determinación de sus propiedades físicas, químicas y radiológicas para establecer la necesidad de un ajuste adicional, tratamiento, acondicionamiento o adecuación para su manejo, procesamiento, almacenamiento o eliminación [4]. Los desechos deben caracterizarse a fin de facilitar la conservación de registros, la aceptación de los desechos de una etapa a otra o su dispensa.

Esta parte de la gestión está contemplada en la NOM-018-NUCL-1995, "Métodos para determinar la concentración de actividad y actividad total en los bultos de desechos radiactivos".

La caracterización radiológica nos ayudará a decidir si un residuo radiactivo puede ser dispensado o no, en cuyo caso deberá gestionarse como un desecho radiactivo, esto se contempla en la NOM-035-NUCL-2000, "Límites para considerar un residuo sólido como desecho radiactivo".

1.4.3. Transporte

Posiblemente sea necesario transportar los desechos radiactivos entre las instalaciones relacionadas con las diferentes etapas de la gestión de los mismos, por lo tanto, para que la gestión sea eficaz es preciso tener en consideración los requisitos que deberán cumplir los bultos de residuos o desechos radiactivos, a este respecto la recomendación que a nivel internacional ha emitido el Organismo Internacional de Energía Atómica y que tanto organizaciones internacionales como gran parte de los estados miembros han adoptado, están contenidas en el documento TS-R-1 "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Edición 2009, y que en el caso de México, en donde a la fecha no existe en la normativa un Reglamento para el Transporte de Material Radiactivo, el Organismo Regulador en la materia, que es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias ha estado requiriendo el cumplimiento con el reglamento recomendado por el

OIEA, cabe resaltar que la otra dependencia facultada a este respecto es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La normativa mexicana contempla el transporte de desechos radiactivos en el “Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos”, en el que se clasifica como material radiactivo a todo aquél que contenga una actividad específica superior a 70 kBq/kg (2nCi/g), dicho valor era recomendado por el OIEA en el Safety Series No. 6, el cual fue sustituido en 1996, cabe resaltar que en dicho documento el límite anterior de 70 kBq/kg fue reemplazado por un conjunto de valores dependientes del radionúclido, por lo cual se observa una inconsistencia entre el Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos y lo requerido por la C.N.S.N.S.

1.4.4. Almacenamiento temporal

El almacenamiento temporal de desechos radiactivos exige velar porque estos desechos se mantengan de modo que:

- Se garanticen el aislamiento, la protección del medio ambiente y la vigilancia.
- Se faciliten los trabajos de tratamiento, acondicionamiento y almacenamiento definitivo.

El almacenamiento temporal es la colocación de los residuos o desechos radiactivos en una instalación que disponga de aislamiento y vigilancia adecuados, de la cual estos residuos o desechos radiactivos podrán ser recuperados en cualquier momento; se puede utilizar, para facilitar la siguiente etapa de la gestión, actuando como un amortiguador entre las etapas o durante ellas o para esperar el decaimiento de los radionúclidos hasta que el desecho alcance niveles para su descarga autorizada, utilización autorizada o dispensa. El Organismo Internacional de Energía Atómica recomienda se utilice el almacenamiento temporal para permitir el decaimiento de los desechos contaminados con radionúclidos de vida media igual o menor a 100 días, en el caso de los desechos con vida media superior a 100 días, recomienda almacenar en el mismo almacén hasta que la cantidad de estos desechos sea suficiente para enviarlos al gestor de desechos radiactivos. El almacenamiento temporal puede efectuarse entre los pasos de la gestión o durante ellos.

Esta parte de la gestión está contemplada en la NOM-028-NUCL-2009, “Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas”.

1.4.5. Tratamiento previo

El tratamiento previo de desechos es el primer paso de la gestión después de que los desechos son producidos, abarca la recolección, segregación, ajuste químico y descontaminación, aunque puede incluir un período de almacenamiento temporal provisional. Para realizar estas operaciones se debe hacer una caracterización adecuada de los desechos que permita la selección correcta de los procesos de tratamiento y acondicionamiento. Esta etapa es muy importante, pues en muchos casos constituye la mejor oportunidad para segregar las corrientes de desechos.

Durante el tratamiento previo se incluye también el embalado de los desechos radiactivos, es necesario hacer éste correctamente, ya que ayuda a la minimización del volumen de desechos, además de dar una contención confiable durante el almacenamiento, facilitar el manejo y simplificar el tratamiento subsiguiente.

El tratamiento previo se contempla en la NOM-028-NUCL-2009, “Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas”.

1.4.6. Tratamiento

En el tratamiento se incluyen las operaciones cuya finalidad es lograr una mayor seguridad o eficiencia económica modificando las características de los desechos. Los conceptos básicos que se aplican en esta etapa son: reducción del volumen, extracción de radionúclidos y modificación de la composición. Entre estas operaciones se encuentran la incineración de desechos combustibles, compactación de desechos sólidos secos, evaporación, filtración o intercambio iónico de corrientes de desechos líquidos, precipitación o floculación de especies químicas. A menudo se combinan varios de estos procesos para lograr la descontaminación eficaz de una corriente de desechos, lo que puede requerir la gestión de varios tipos de desechos radiactivos secundarios generados en dichos procesos. Un objetivo importante de esta etapa es aumentar la seguridad a corto plazo efectuando mejoras inmediatas en las características de los desechos.

El tratamiento se contempla en la NOM-020-NUCL-1995, “Requerimientos para instalaciones de incineración de desechos radiactivos” y NOM-036-NUCL-2001 “Requerimientos para instalaciones de tratamiento y acondicionamiento de los desechos radiactivos”.

1.4.7. Acondicionamiento

El acondicionamiento consiste en las operaciones realizadas con el fin de dar a los desechos una forma adecuada para su manipulación, transporte, almacenamiento temporal y almacenamiento definitivo. Puede comprender la inmovilización de desechos, su introducción en contenedores y en un embalaje suplementario. Entre los métodos de inmovilización se cuentan la solidificación de desechos líquidos de actividad baja e intermedia en cemento o alquitrán y la vitrificación de desechos líquidos de actividad alta en una matriz de vidrio. Los desechos inmovilizados se envasan en contenedores que pueden ser desde bidones de acero de 200 litros hasta contenedores de gruesas paredes y compleja tecnología.

1.4.8. Almacenamiento definitivo

Es la etapa final de la gestión de desechos. Se trata fundamentalmente de la colocación de éstos en una instalación para su almacenamiento definitivo sin intenciones de recuperarlos y con una garantía razonable sobre la seguridad, minimizando hasta donde sea posible la necesidad de una vigilancia a largo plazo o servicios de mantenimiento. Esta seguridad se logra mediante la concentración y contención de los desechos debidamente solidificados, aislados y acondicionados en una instalación con barreras que permitan el confinamiento y aislamiento de los mismos por el tiempo necesario para que éstos dejen de ser un riesgo inaceptable para la población y el ambiente. El aislamiento se consigue rodeando los desechos de múltiples barreras tanto naturales como de ingeniería para evitar la fuga de los radionúclidos al medio ambiente. Durante el período en que el sistema de barreras múltiples sirve de contención a los desechos, los radionúclidos en ellos se desintegran, reduciendo la actividad de los desechos radiactivos. El diseño del sistema de barreras múltiples depende de la opción de almacenamiento definitivo elegida y de la corriente de desechos de la que se trate.

Este paso de la gestión está contemplado en la NOM-019-NUCL-1995, “Requerimientos para bultos de desechos radiactivos de nivel bajo para su

almacenamiento definitivo cerca de la superficie”, NOM-022/1-NUCL-1996, “Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 1, sitio”, NOM-022/2-NUCL-1996, “Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 2, diseño”, NOM-22/3-NUCL-1996 “Requerimientos para una instalación para el almacenamiento definitivo de desechos radiactivos de nivel bajo cerca de la superficie. Parte 3, construcción, operación, clausura, postclausura y control institucional”.

1.5. Vías de gestión de residuos [6]

Desde el punto de vista radiológico se pueden distinguir dos vías distintas de gestión para los residuos contaminados, estas vías son:

1. Gestión convencional: Si el residuo no requiere de ninguna consideración especial desde el punto de vista del riesgo radiológico, dicho residuo se maneja como un residuo “convencional”. Los residuos que se manejan de esta manera son aquellos que tengan niveles de actividad y concentración de actividad por debajo de los niveles de dispensa que se verán en el siguiente capítulo y los residuos generados por prácticas exentas o por la utilización de fuentes excluidas, términos que también serán discutidos en el siguiente capítulo. En este tipo de gestión existen los siguientes subtipos:
 - i. Gestión como desecho urbano.
 - ii. Gestión como desecho tóxico, que se aplica en caso de que el desecho contenga algún otro tipo de peligro, ya sea biológico, químico o de otro tipo.
 - iii. Reutilización del material, que se aplica en general para la ropa contaminada, además de poder ser aplicado para otros residuos.
2. Gestión como desecho radiactivo: Se hace por medio de una empresa gestora de desechos radiactivos, que en el caso de México es el ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) a través del PATRADER (Planta de TRAtamiento de DEsechos Radiactivos) y del CADER (Centro de Almacenamiento de DEsechos Radiactivos). Los desechos

manejados de esta manera son aquellos con características radiológicas que no les permitan ser gestionados de manera convencional.

En el diagrama de flujo presentado en la figura 1 es importante aclarar que la caracterización, el almacenamiento temporal y el transporte pueden ser necesarios y llevarse a cabo más de una vez, en distintas etapas del proceso de gestión, aunque en el diagrama aparecen sólo en una ocasión.

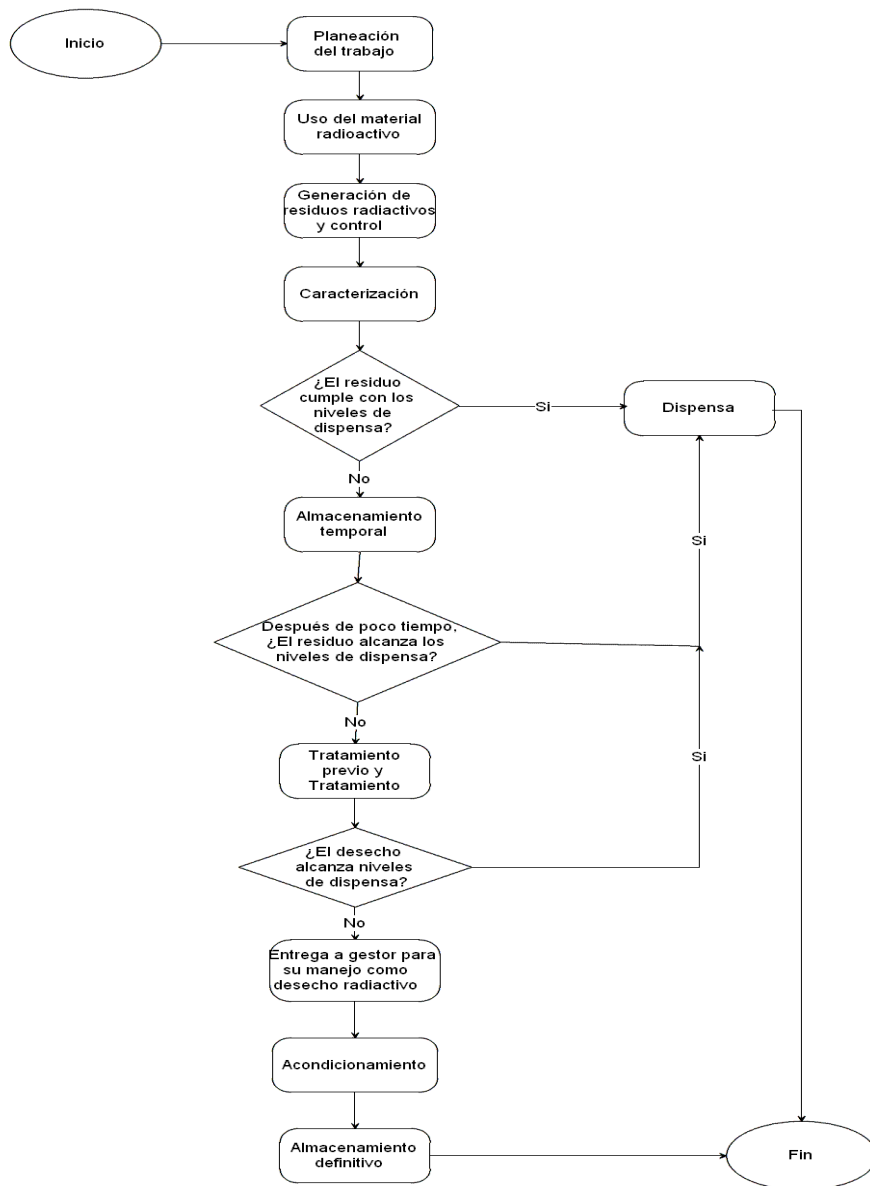


Fig. 1: Pasos de la gestión de DR

Capítulo 2

Dispensa de residuos contaminados con material radiactivo

Como ya se mencionó antes, un residuo es considerado como desecho radiactivo si su concentración de actividad o actividad superficial están por encima de cierto nivel establecido por la C.N.S.N.S., de esta forma se pueden tener residuos contaminados o que contengan material radiactivo por debajo de este nivel, y el residuo será entonces tratado como residuo no radiactivo y gestionado por las vías usuales, a menos que contenga algún otro peligro (químico o biológico). En caso de que el residuo implique un peligro químico o biológico, éste tendrá que ser tratado de acuerdo a lo establecido en la normativa para su caso.

2.1. Dispensa de residuos, descarga de efluentes y otros conceptos

Los conceptos que se definen en esta sección son aquellos conceptos relacionados directamente con la liberación de alguna fuente de radiación de todas o algunas partes del sistema de control regulador.

2.1.1. Dispensa

La dispensa consiste en la liberación del control regulador en materia nuclear de un residuo contaminado con material radiactivo si este cumple con ciertos criterios establecidos por el órgano regulador conocidos como criterios de exención. Los criterios especificados para México en la NOM-035-NUCL-2000 “Límites para considerar un residuo sólido como desecho radiactivo” son:

- Equivalente de dosis efectiva para el público inferior a $10\mu\text{Sv/año}$.
- Equivalente de dosis efectiva colectiva en un año inferior a 1 Sv-hombre.

En la norma mencionada anteriormente se definen dos niveles de dispensa, el primero de éstos recibe el nombre de nivel de dispensa incondicional, que es el límite a partir del cual se determina si un residuo es declarado como desecho radiactivo o puede ser gestionado por métodos convencionales, el segundo de éstos recibe el nombre de nivel de dispensa condicional, es un valor obtenido a partir de los escenarios particulares a los que se someterá el residuo y que permiten determinar si éste es declarado como desecho radiactivo o puede ser gestionado por métodos convencionales al verificar que se cumplan los criterios de exención.

Los niveles de dispensa dependen del radioisótopo o la mezcla de radioisótopos contenidos en el residuo y para los desechos sólidos (sin tomar en consideración fuentes selladas agotadas, edificios y tierra contaminada, materiales de consumo y NORM en el que las concentraciones no han sido alteradas mediante algún proceso [7]) los límites para dispensa incondicional son establecidos en la NOM-035-NUCL-2000 “Límites para considerar un residuo sólido como desecho radiactivo” y se dan en concentración de actividad (Bq/g) o en contaminación superficial fija (Bq/m²). Este concepto es aplicable para desechos sólidos.

Los niveles de dispensa establecidos en la NOM-035-NUCL-2000 son valores de referencia avalados internacionalmente y publicados por el OIEA en el documento IAEA-TECDOC-855 “Clearance levels for radionuclides in solid materials. Application of exemption principles”, sin embargo, el mismo organismo en el documento IAEA-TECDOC-1000 “Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research” publicado en 1998, presenta niveles de dispensa que aplican en particular a las aplicaciones médicas.

2.1.2. Descarga

Para el caso de desechos radiactivos líquidos o gaseosos se define el concepto de descarga de efluentes, que consiste en la liberación del desecho al ambiente, si su concentración en aire, agua y otros líquidos no rebasa aquellos valores presentados en la NOM-006-NUCL-1994, “Criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos de la población”. En esta norma también se establecen otras características a tomar en cuenta al momento de la descarga de efluentes, éstas son:

- En un período de un año las liberaciones al ambiente no excederán de 185 GBq para ^3H , 37 GBq para ^{14}C y 37 GBq para el resto de los radionúclidos combinados.
- $\sum \frac{C_i}{L_i} < 1$. Donde C_i es la concentración del radionúclido i , L_i es el límite del mismo. Esto es aplicable para mezclas de radionúclidos.

2.1.3. Exclusión y exención

Se sabe que existen exposiciones esencialmente no controlables, se trata de condiciones en que resulta prácticamente imposible controlar el grado de exposición a la radiación, un ejemplo claro es la exposición por ^{40}K en el cuerpo humano, en estos casos se hace una exclusión de dicha fuente frente al control regulador nuclear.

Para el caso de prácticas debidamente justificadas y cuyo riesgo radiológico es suficientemente bajo como para que no resulte adecuado dedicar recursos para su control regulador nuclear se aplica la exención, que consiste en eximir del cumplimiento de ciertos requisitos administrativos al usuario, cuando se cumpla con los criterios de exención, que ya fueron mencionados en la sección de dispensa.

2.2. Dispensa en medicina nuclear [3]

Los desechos radiactivos generados en la medicina no implican un riesgo radiológico significativo al ser comparados con los generados en otras aplicaciones de la radiación, al estar caracterizados por una vida media corta y baja radiotoxicidad. Estos desechos contienen emisores β y γ de bajas energías y generalmente tienen baja actividad total y específica.

Es necesario prestar especial atención al volumen de los desechos y a otras propiedades peligrosas, como los riesgos biológicos y químicos que pueda representar el desecho.

En el caso de las aplicaciones a la medicina se tiene la ventaja de que la mayor parte de los desechos radiactivos producidos contienen sólo un radionúclido, sin embargo es necesario hacer la segregación de éstos en el momento de su producción, con la finalidad de facilitar su gestión.

Debido a la baja actividad, las bajas energías de emisión y la corta vida media de estos desechos, la mejor opción de gestión es el almacenamiento temporal en el lugar de producción para su decaimiento hasta alcanzar niveles de dispensa, ocasionando un mínimo de riesgos de transporte y niveles de exposición muy bajos, además se deben seguir los principios de prevención y minimización de desechos, dando protección al personal y al ambiente y considerando todos los peligros potenciales de los desechos. Se sugiere, en este tipo de desechos hacer segregación de acuerdo a las vidas medias de los radionúclidos contenidos, de la siguiente manera:

- Vida media de alrededor de 10 horas o menos.
- Vida media de menos de 10 días.
- Vida media de menos de 100 días.
- Vida media de más de 100 días.

Se debe tener en cuenta la generación de desechos de la instalación particular. Además deben tomarse en cuenta otras características, como son el contenido de actividad y de radioisótopos, peligros no radiológicos, forma física y química, entre otras características. La ventaja de hacer segregación por vidas medias consiste en la facilidad para el establecimiento de tiempo de almacenamiento temporal para su dispensa o descarga, aunque se debe tener en cuenta para esto también la actividad inicial.

Aquellos desechos líquidos que cumplan con los niveles de descarga pueden ser vertidos directamente a un sistema de drenaje autorizado, sin embargo, esto no es posible si no se garantiza que el desecho cumple con todos los requerimientos de seguridad radiológicos, químicos y biológicos. Aquellos desechos que no puedan ser liberados al ambiente deben ser segregados de acuerdo con los radionúclidos y actividades contenidas y los peligros no radiológicos

que representen, debe evitarse mezclarlos en cualquier momento, y en caso de representar un peligro biológico se deben desactivar los componentes infecciosos contenidos en el.

Capítulo 3

Clasificación y segregación de desechos radiactivos

La clasificación de desechos radiactivos es necesaria con el fin de establecer criterios y requisitos que lleven a una segura y adecuada gestión de estos, tomando en cuenta el origen y sus constituyentes químicos, biológicos y radiactivos que representan un riesgo para el ser humano y el ambiente, la concentración, vida media, actividad y origen de los radionúclidos contenidos en el desecho.

Un sistema de clasificación debe simplificar el lenguaje y ayudar a la planeación de las etapas de gestión, en particular del almacenamiento definitivo y es de utilidad en cuestiones genéricas de seguridad. Al ir acompañada de valores límite establecidos por el regulador se garantiza la seguridad.

Una clasificación ideal de desechos debe cumplir ciertos objetivos, que incluyen [2]:

- Cubrir todos los tipos de desechos existentes.
- Considerar todas las etapas de la gestión.
- Relacionar las clases de desechos al peligro potencial.
- Ser flexible ante necesidades específicas.
- Cambiar en la menor cantidad posible la terminología ya existente y aceptada.
- Ser simple y fácil de entender.

- Ser tan universalmente aplicable como sea posible.

De estas características se debe dar mayor atención a la flexibilidad y simplicidad del sistema.

3.1. Métodos de clasificación [2]

Existen distintas formas de obtener una clasificación, que dependen de los propósitos de la misma. Un método clásico es la descripción cualitativa de las distintas clases, utilizando características generales de los desechos como criterios de clasificación. A pesar de tratarse de una clasificación cualitativa puede ser útil el uso de valores numéricos. El otro método es una aproximación cuantitativa.

Existen distintas formas de clasificación que se dan de forma natural, por ejemplo, se pueden clasificar los desechos de acuerdo a su origen, o por su estado físico (líquido, sólido o gaseoso). Estos sistemas no cumplen con muchas de las características que se buscan en un sistema de clasificación, aunque el último puede ser utilizado a nivel instalación para facilitar el manejo de ciertas corrientes de desechos.

El sistema de clasificación cualitativa más utilizado divide a los desechos en desechos radiactivos de nivel bajo, nivel intermedio y nivel alto, tomando en cuenta el contenido de actividad, la radiotoxicidad y la potencia térmica. También se puede hacer dentro de esta clasificación una separación entre desechos de vida media corta y de vida media larga, con el objetivo de facilitar la selección de las características del almacén definitivo.

Para una descripción cuantitativa es necesario ver más propiedades de los desechos, como son:

- Origen.
- Criticidad.
- Propiedades radiológicas: vida media, generación de calor, penetración de la radiación, actividad y concentración de radionúclidos, contaminación superficial, factores de dosis de los radionúclidos relevantes.
- Otras propiedades físicas: estado físico, tamaño, peso, compactabilidad, dispersabilidad, volatilidad, solubilidad.

- Propiedades químicas: peligro potencial químico, resistencia a la corrosión, contenido orgánico, combustibilidad, reactividad, generación de gases, adsorción y absorción de radionúclidos.
- Propiedades biológicas: peligro potencial biológico.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) propuso un sistema de clasificación que separa a los desechos radiactivos para su almacenamiento definitivo en 3 clases, éstas son:

1. Desechos de alto nivel (HLW por sus siglas en inglés): líquidos altamente radiactivos, que contengan productos de fisión, así como algunos actínidos, que son separados durante el reprocesamiento químico del combustible nuclear irradiado, cualquier otro desecho con niveles de radiactividad lo suficientemente intensos como para generar cantidades significativas de calor durante el proceso de decaimiento, o el combustible nuclear irradiado una vez que es declarado desecho.
2. Desechos de nivel intermedio (ILW por sus siglas en inglés): desechos que por su contenido de radionúclidos requieran blindaje pero no requieran o requieran pocos sistemas de disipación de calor durante su manejo y transporte.
3. Desechos de bajo nivel (LLW por sus siglas en inglés): desechos que por su bajo contenido en radionúclidos no requieran blindaje para su manejo y transporte.

Dentro de las dos últimas clases se hace también una separación entre los desechos de vida media larga y los de vida media corta, así como de desechos portadores de alfas. Los desechos de larga vida media son aquellos que no decaerán a niveles aceptables de actividad desde el punto de vista radiológico durante el período de control administrativo, los de vida media corta decaerán a niveles aceptables de actividad durante el control administrativo, y los portadores de alfas son aquéllos que contienen radioisótopos emisores de partículas alfa en cantidades superiores a los límites aceptables establecidos por el regulador.

Este sistema de clasificación es muy útil para propósitos generales, sin embargo tiene ciertas limitaciones. No tiene una conexión clara a aspectos de seguridad en gestión de desechos, en particular a la etapa de almacenamiento

definitivo, no cuenta con fronteras cuantitativas entre las distintas clases, no considera desechos con tan poca actividad que puedan ser liberados de control radiológico, aunque por sus propias características puedan o no requerir otro tipo de control, por ejemplo químico o biológico. También le falta considerar los desechos provenientes de la minería y molienda.

Para mejorar el sistema de clasificación y disminuir en lo posible las limitaciones del mencionado anteriormente, el OIEA sugiere algunas modificaciones a éste, dando origen a un nuevo sistema, en el que los desechos se separan en tres clases distintas:

1. Desecho dispensado: su nivel de actividad es igual o inferior al nivel de dispensa establecido por el regulador y cuyo cálculo está basado en una dosis anual al público menor a 0.01 mSv.
2. Desecho de nivel bajo o intermedio: su nivel de actividad es superior al nivel de dispensa y su potencia térmica está por debajo de los 2 kW/m³ y se subdivide en:
 - i Desecho de vida media corta: cuenta con una restricción en la concentración de radionúclidos de vida media larga a 4000 Bq/g en paquetes individuales y un promedio de 400 Bq/g.
 - ii Desecho de vida media larga: tiene concentración de radionúclidos de vida media larga por encima del límite para los desechos de vida media corta.
3. Desecho de alto nivel: su potencia térmica esta por encima de 2 kW/m³ y su concentración de radionúclidos de vida media larga esta por encima del límite para los desechos de vida media corta.

Durante la clasificación de los desechos se deben también tomar en consideración algunas otras características, éstas son:

- Contención de radioisótopos naturales de vida media larga en el desecho: los desechos provenientes de la minería y molienda o actividades similares pueden contener uranio, torio y radio, al igual que algunos desechos generados durante el cese de operaciones y las actividades posteriores a éste de instalaciones nucleares. Generalmente las concentraciones de estos radionúclidos es tan baja que el desecho puede ser dispensado o ser evacuado como un desecho de vida media corta.

- Generación de calor: aunque es una característica importante de los desechos de alto nivel, desechos en otra clase también pueden generar calor, a una tasa menor. La generación de calor depende de las características de los isótopos contenidos (vida media, energía de decaimiento, etc.). Sistemas para el manejo del calor generado deben ser incluidos en la instalación si se espera que esta albergue desechos con una potencia térmica de varios W/m^3 , especialmente si son desechos de vida media larga.
- Desechos líquidos o gaseosos: el manejo de estos tipos de desechos incluye la separación de los radionúclidos contenidos en estos y su posterior concentración en forma sólida, hasta que la fase líquida o gaseosa tenga niveles de actividad por debajo de los niveles establecidos por el regulador para su descarga al ambiente como efluente y puede incluir una etapa de almacenamiento para decaimiento. Cuando no sea posible su descarga como efluente se debe acondicionar para su almacenamiento definitivo. Estos desechos se pueden clasificar de acuerdo al tratamiento adecuado a seguir y su peligro potencial radiológico, químico y biológico.

Además de estas clasificaciones, ENRESA, que es la empresa encargada de la gestión de desechos radiactivos en España, recomienda una clasificación para desechos generados en instalaciones del ámbito sanitario, entre las cuales se incluyen las instalaciones de medicina nuclear, esta clasificación es la siguiente [6]:

- Sólidos contaminados no putrescibles: En ellos se contemplan papeles contaminados, algodones, plásticos, guantes, ropa de protección, pipetas, puntas de pipeta, jeringas con o sin agujas, vial original con actividad residual no utilizada y en ocasiones con ciertas cantidades de líquidos, si se da el caso de que el vial no se haya utilizado.
- Sólidos contaminados putrescibles: En esta parte se incluyen sólidos con materia orgánica de pacientes de terapia metabólica, excretas de pacientes de terapia metabólica y diagnóstico, restos de intervenciones quirúrgicas.
- Líquidos acuosos: Se incluyen líquidos procedentes de análisis clínicos, orinas de pacientes de terapia metabólica y diagnóstico.

- Líquidos orgánicos: Son los líquidos procedentes de análisis clínicos con centelleadores orgánicos.
- Fuentes radiactivas encapsuladas con fines de terapia o de calibración de equipos de medida.
- Sólidos radiactivos con fines de terapia, como hilos de Ir-192.

3.2. Clasificación en la normativa mexicana

En nuestro país la C.N.S.N.S. es la responsable de generar y garantizar el cumplimiento de las normas relacionadas al uso de la radiación y de los radioisótopos, incluyendo aquellas relacionadas a la gestión de los desechos radiactivos, en este sentido, ha publicado la NOM-004-NUCL-1994 “Clasificación de los desechos radiactivos” en esta norma se establece que los desechos considerados radiactivos serán separados en los siguientes tipos [8]:

1. Desechos radiactivos de nivel bajo: clase A, clase B y clase C.
2. Desechos radiactivos de nivel intermedio.
3. Desechos radiactivos de nivel alto.
4. Desechos mixtos.
5. Jales de Uranio y Torio.

La pertenencia de un desecho a cualquiera de los primeros dos tipos mencionados se determina en función de tablas y cálculos que son explicados en la norma oficial mexicana mencionada, junto con un ejemplo de la aplicación de dichos criterios.

Se considera que un desecho radiactivo es de nivel alto si se trata del combustible nuclear irradiado una vez declarado como desecho radiactivo, desechos radiactivos líquidos o sólidos provenientes del primer ciclo del proceso de extracción o de algún otro proceso, los desechos concentrados en cualquier ciclo consiguiente del proceso de extracción o de algún otro proceso en una instalación para el reprocesamiento del combustible nuclear, desechos sólidos resultantes de la solidificación de los desechos líquidos antes mencionados o cualquier otro desecho con niveles de radiactividad comparables a los otros considerados de alto nivel.

Los desechos mixtos son aquéllos que son considerados radiactivos y contienen además algún otro peligro de acuerdo a la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características que hacen a un residuo peligroso, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Por último, los jales de uranio y torio son aquéllos provenientes del procesamiento de la mena en una planta de beneficio donde se extrae el uranio o el torio contenido en ésta.

Esta clasificación es aplicable para fines de almacenamiento definitivo de desechos radiactivos, sin embargo en la NOM-028-NUCL-2009 “Manejo de desechos radiactivos en instalaciones radiactivas que utilizan fuentes abiertas”, en la cual se pide la segregación de los desechos, se hace la siguiente clasificación [9]:

1. Desechos radiactivos sólidos.
 - i. Punzocortantes.
 - ii. Con residuos biológico-infecciosos y cadáveres de animales.
2. Desechos radiactivos líquidos.
 - i. No acuosos.
 - ii. Acuoso.
 - iii. Aceites.

Además en cada caso se recomienda hacer segregación por vidas medias, diferenciando aquellos desechos contaminados con radionúclidos de vida media menor a un año de aquellos contaminados con radionúclidos de vida media mayor a un año.

Capítulo 4

Caracterización de residuos contaminados con material radiactivo

En distintas etapas del proceso de gestión previo al almacenamiento definitivo, los desechos deben caracterizarse en función de sus propiedades físicas, químicas, biológicas y radiológicas. Dicha caracterización servirá para proporcionar información pertinente para el control del proceso y dar garantías de que los desechos cumplen con los criterios de aceptación para almacenamiento temporal, transporte y almacenamiento definitivo, así como para identificar y evaluar aquellos desechos que no cumplan con las especificaciones del proceso o los criterios para la disposición final [10] y para determinar si algún residuo debe ser dispensado.

Las técnicas de caracterización se clasifican en 3 tipos, que son:

- Conocimiento del proceso.
- Ensayos no destructivos.
- Análisis destructivos.

4.1. Métodos y técnicas de caracterización

4.1.1. Conocimiento del proceso

Consiste en el conocimiento y correcta documentación de los procesos que generan los desechos, esto ayuda a reducir las posibles características del residuo a caracterizar y los métodos a utilizar.

4.1.2. Caracterización radiológica no destructiva [11]

Estos métodos se pueden definir como la observación de sucesos radiactivos espontáneos o inducidos, interpretados para estimar el contenido de uno o más radionúclidos de interés en el objeto ensayado sin afectar la forma física y química del material.

Los métodos no destructivos incluyen: calorimetría, detección pasiva por espectrometría gamma de alta y baja resolución, detección activa con fuente gamma externa por espectrometría gamma de alta resolución, recuento pasivo de neutrones por coincidencia, recuento de neutrones pasivo/activo (PAN), gammagrafía digitalizada y tomografía.

Exploración gamma de bultos de residuos

Tiene por objeto identificar los radionúclidos en el bulto de desechos por medida directa de la energía de los diferentes foto picos del espectro o por medida indirecta a través de relaciones de equilibrio radiactivo y cuantificar la actividad de los radionúclidos emisores gamma identificados por métodos directos o indirectos por registro de la tasa de recuento del área neta de los foto picos correspondientes y la aplicación de la apropiada metodología de calibración.

Las condiciones que serían exigibles a los bultos para una caracterización radiológica no destructiva más precisa son:

- Las partículas que contienen el material radiactivo han de ser lo suficientemente pequeñas como para que el efecto de la auto absorción de la radiación gamma emitida sea mínimo,
- La mezcla del material en cada segmento del bulto de residuos radiactivos debe ser razonablemente uniforme, con el fin de aplicar un factor de corrección por atenuación a partir de una medida de transmisión o de

la densidad aparente del bidón obtenida a partir del peso neto del bulto y del volumen del contenedor.

Tomografía

Una fuente gamma o X envía un haz plano a un conjunto de detectores, se genera un tipo de radiografía digital de la sección irradiada, el bulto se rota para obtener proyecciones a varios ángulos, luego la computadora reconstruye la imagen como un mapa de densidades.

Esta técnica permite superar las incertidumbres asociadas a cambios de densidad en la matriz y distribución de radionúclidos, permite una relativa facilidad para eliminar puntos calientes permitiendo la reclasificación del bulto. Permite además el análisis no destructivo de la homogeneidad física de los bultos.

Metodología de factor de escala [12]

Algunos de los radionúclidos contenidos en los residuos son fáciles de medir, ya sea por medio de análisis destructivos o ensayos no destructivos, sin embargo, la mayoría de éstos son difíciles de medir por cualquiera de estos métodos y algunos otros incluso son imposibles de medir. La radiactividad en cualquiera de estos últimos dos casos puede ser calculada por medio de la metodología de factor de escala, la cual utiliza correlaciones entre éstos y los de fácil medida, que pueden ser medidos directamente o calculados teóricamente a partir de la tasa de dosis en contacto. Se define el factor de escala como la media geométrica de las relaciones de actividad entre los isótopos de difícil medida respecto de los de fácil medida, según la expresión:

$$FE = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{i=n} \frac{y_i}{x_i}}$$

donde FE es el factor de escala, y_i la concentración de actividad o actividad específica del isótopo de difícil medida en la muestra i , x_i la concentración de actividad o actividad específica del isótopo de fácil medida en la muestra i y n es el número de muestras.

Esta media geométrica no puede ser aplicada sin verificar antes varios aspectos, relacionados con las características de los isótopos de fácil y difícil medida.

Se espera que el isótopo de fácil medida sea emisor gamma con una energía de fácil detección y una vida media relativamente alta. Por otro lado, se

espera que el isótopo de difícil medida tenga un mecanismo de producción similar a la del isótopo de fácil medida relacionado, es decir, que ambos sean productos de fisión o productos de activación, así como solubilidad y mecanismo de transporte similares a las del isótopo de fácil medida relacionado, sólo cuando se cumplan estas características es posible aplicar este método.

De la expresión del factor de escala es posible obtener la siguiente expresión:

$$y = Ax^b$$

donde y es la concentración del isótopo de difícil medida, x la del isótopo de fácil medida, b puede generalmente aproximarse a la unidad y A es el factor de escala.

Las correlaciones más frecuentemente utilizadas son: Fe-55/Co-60, Ni-59/Co-60, Ni-63/Co-60, Sr-90/Cs-137, Sr-90/Co-60, Pu-241/Co-60, Pu-241/Cs-137, Pu-238/Pu-241, Pu-239/Pu-241, Am-241/Pu-241, Cm-244/Pu-241.

4.1.3. Caracterización radiológica destructiva

A diferencia de la caracterización no destructiva, en este caso se altera la forma física y/o química del desecho a caracterizar.

Solubilización de muestras [13]

El método para resinas y concentrados de evaporador consiste en la oxidación en caliente y a reflujo con agua oxigenada en medio sulfúrico. Este proceso se realiza 2 veces, uno de ellos se reserva para el análisis de H-3, C-14, Cl-36, Tc-99, I-129 y en el otro se realiza un tratamiento ácido para solubilizar los posibles productos de corrosión y que suelen acompañar a las resinas, especialmente las de tipo polvo. En la disolución obtenida se analizan los restantes radionúclidos hasta completar la totalidad prevista en la caracterización de estos materiales. Desechos de materiales químicamente más resistentes requieren el uso de agentes químicos más enérgicos.

Métodos radioquímicos [13, 14]

La determinación de radionúclidos emisores gamma con energías superiores a 50 keV no presentan dificultades, sin embargo hay un gran número de radionúclidos con elevada vida media, cuyas emisiones alfa, beta, gamma débil y X requieren antes de su medida separaciones radioquímicas selectivas

para cada uno, la calidad radiológica de dichas separaciones debe ser elevada, de modo que permita la obtención de factores de separación superiores a 2000.

Dependiendo de la clase de emisión radiactiva, los núclidos se agrupan en:

- Emisores alfa: la dificultad es su baja concentración radiactiva, por lo cual su cuantificación, a parte de la mayor complejidad de los procedimientos de separación exige tiempos elevados. Incluye: coprecipitación selectiva, extracción líquido-líquido, intercambio iónico, electrodeposición y medida por espectrometría alfa.
- Emisores beta puros: la forma continua del espectro impide la identificación en las mezclas conjuntas, se hace una espectrometría beta mediante centelleo hasta el final.
- Emisores gamma débil y X: es necesario recurrir a separaciones radioquímicas antes de medirlos.
- Emisores gamma fuerte: son radionúclidos cuya emisión gamma permite la determinación directa mediante espectrometría gamma, tanto individualmente como en mezclas, no obstante en algunos casos también es necesario disponer de procedimientos de separación previa, para sensibilizar la presencia de ciertos radionúclidos con poca contribución radiactiva.

Las etapas de este método son:

1. Disolución de la muestra problema: en el caso de muestras sólidas la primer etapa es la disolución de las muestras, en la cual los radionúclidos a determinar son transferidos de la muestra sólida a la solución. Las técnicas utilizadas dependen de la composición y naturaleza de las muestras. En el caso de muestras líquidas sólo para concentraciones muy bajas se debe aplicar un procedimiento de concentración previa para mejorar la sensibilidad de la determinación. Los métodos de disolución varían de acuerdo a la composición principal de la matriz:
 - i. Matrices inorgánicas: el método más simple es su ataque por ácidos minerales, especialmente para muestras metálicas. Cuando se trata de materiales refractarios que no pueden disolverse por vía húmeda es necesario recurrir a procedimientos de fusión alcalina.

- ii. Matrices orgánicas: muchas pueden mineralizarse mediante el uso de mezclas de diversos ácidos minerales por vía húmeda. Para evitar la pérdida de los elementos volátiles el proceso se realiza a reflujo, de esta forma dichos elementos permanecerán en la disolución.
2. Adición de portadores y trazadores: en una muestra radiactiva la concentración másica de los radionúclidos es tan insignificante que estos pueden ser absorbidos por cualquier material sólido, esto hace que métodos radioquímicos basados en precipitaciones selectivas no se puedan aplicar en estas condiciones. Esto puede evitarse añadiendo a las muestras una cantidad significativa del elemento estable del radionúclido a determinar, este recibe el nombre de portador. En general el mejor momento para añadir el portador es durante el ataque y disolución de la muestra. Aunque en general el portador se emplea para el isótopo radiactivo cuya separación se va a realizar y cuya actividad se va a medir, en ocasiones se utilizan portadores de otros isótopos radiactivos para impedir que alguno de estos acompañe al producto que se quiere separar, recibiendo el nombre de portadores de retención. En el caso de los trazadores se añade a las muestras un radionuclido que es un isótopo radiactivo del que se va a medir. Dicho trazador permite establecer la relación entre la radiactividad medida y la que está inicialmente presente en la muestra, permite establecer el rendimiento químico del proceso, en este caso mediante la medida radiactiva del trazador. Pese a ello es conveniente en ocasiones adicionar también portadores. Para la elección del trazador se deben tomar en cuenta:
- La simplicidad en la medida, teniendo una vida media adecuada,
 - Propiedades radioquímicas, químicas y físicas del trazador bien conocidas,
 - Debe tener un comportamiento igual al de los radionúclidos a determinar,
 - Su radiación debe tener una energía diferente a la de los radionúclidos a determinar para que no interfieran en el espectro,
 - El trazador no debe estar presente como componente de la muestra, esto llevaría a cometer graves errores en la determinación del rendimiento químico.

3. Separación química del radionúclido a determinar: van desde los más tradicionales como precipitación, extracción líquido-líquido, destilación, cromatografía de intercambio iónico a los modernos como cromatografía de extracción, de gases, líquida de alta resolución.
 - Precipitaciones selectivas: formación de una fase sólida de una solución por la adición de un reactivo apropiado.
 - Extracción líquido-líquido: se basa en la transferencia de una o más sustancias entre dos fases líquidas inmiscibles puestas en contacto íntimo entre sí. El fundamento de la técnica es la diferencia de solubilidad de los solutos entre las dos fases. Los iones metálicos hidratados que existen en solución acuosa deben transformarse en un complejo sin carga más soluble en el disolvente que en el agua.
 - Cromatografía de intercambio iónico: es el método más utilizado para separaciones radioquímicas de todos los métodos cromatográficos. El procedimiento se basa en la retención o fijación del elemento de interés en una columna de intercambio iónico.
 - Cromatografía de extracción: se basa en la adaptación de los métodos selectivos de extracción líquido-líquido en la producción de nuevos materiales cromatográficos.
4. Medida de la actividad del radionúclido a determinar: el tipo de detector que se utilice depende fundamentalmente del tipo de emisión del radionúclido a determinar.

4.2. Caracterización de residuos en la normativa mexicana

De acuerdo a la NOM-018-NUCL-1995 “Métodos para determinar la concentración de actividad y actividad total en los bultos de desechos radiactivos” los métodos de medición aceptables son [15]:

1. Balance de materiales: es aceptado cuando se usan y poseen un número limitado de radionúclidos en concentraciones y actividades conocidas durante todo el proceso de manera confiable, mediante un balance de entradas y salidas.

2. Clasificación por fuente: cuando el desecho es una fuente sellada y se cuenta con certificado de calibración y prueba de fuga que confirme la integridad de la fuente, la actividad es calculada con la expresión $A=A_0e^{-0,693t/T_{1/2}}$ donde A es la actividad de la fuente como desecho, A_0 su actividad al momento de la calibración, t el tiempo transcurrido entre la fecha de calibración y el cálculo de la actividad como desecho en segundos, $T_{1/2}$ la vida media del radionúclido en segundos. Si la prueba de fuga demuestra que la integridad de la fuente está comprometida o no se cuenta con certificado y fecha de calibración la actividad debe calcularse por medición de radionúclidos específicos.
3. Mediciones de la actividad total: son métodos aceptables para todos los tipos de desechos radiactivos siempre que se cumplan las siguientes condiciones:
 - Las mediciones deben estar correlacionadas sobre una base consistente con la distribución de los radionúclidos dentro de la corriente analizada.
 - Se debe determinar la distribución de los radionúclidos y verificarse periódicamente mediante medición de radionúclidos específicos.
4. Medición de radionúclidos específicos: consiste en la medición de cada uno de los radionúclidos mediante técnicas de espectrometría gamma o radioquímica, o mediante el establecimiento de un programa de mediciones que permita la determinación de la concentración de los radionúclidos de difícil medida.
 - Espectrometría gamma: es aplicable a radionúclidos cuya emisión gamma pueda utilizarse para determinar su actividad bajo las siguientes condiciones:
 - i. La concentración mínima detectable no debe ser mayor a los niveles de dispensa establecidos por la C.N.S.N.S.
 - ii. Se deben realizar al menos dos muestras por lote para desechos de bajo nivel.
 - iii. Se deben efectuar mediciones rutinarias cuando se presenten variaciones en el proceso generador del desecho.
 - iv. Se deben generar registros y hacer seguimientos de la técnica utilizada, a fin de corroborar su aplicación correcta.

- Determinación de la actividad por inferencia: la actividad se determina en función de la medición de radionúclidos de fácil medida y mediante la utilización de factores de correlación, tomando en cuenta que la concentración mínima detectable no debe ser mayor a los niveles de dispensa establecidos por la C.N.S.N.S.
- Determinación de la actividad por técnicas de radioquímica: es aplicable cuando la actividad no pueda ser determinada por otras técnicas, éstas implican una separación y aislamiento de los radionúclidos para su cuantificación, tomando en cuenta que la concentración mínima detectable no debe ser mayor a los niveles de dispensa establecidos por la C.N.S.N.S.

4.3. Caracterización de residuos generados en medicina nuclear

Como ya se ha comentado antes, los residuos generados en medicina nuclear pueden ser comunmente liberados del control regulatorio en materia nuclear, sin embargo esto se complica debido a la dificultad para la caracterización radiológica de dichos residuos, esto último causado por la gran variedad de actividad, isótopos, presentación y forma física.

Para hacer una adecuada caracterización de estos residuos es recomendable agrupar las técnicas con procesos de realización similar, de forma que los residuos que se generen en cada grupo sean lo más parecidos posible en sus características fisicoquímicas y radiológicas. Una vez establecidos dichos grupos, se realiza la caracterización para cada uno de ellos, lo cual no implica realizar medidas de todas las técnicas del grupo, sino de una selección que permita asignar una actividad general a todas las técnicas de un grupo.

El proceso de una técnica está constituido por el conjunto de etapas que se llevan a cabo en la realización de ésta, en la cual se van generando residuos contaminados con material radiactivo.

4.3.1. Criterios de clasificación para los grupos de técnicas [6]

Las técnicas se agrupan considerando los siguientes criterios:

1. Forma física del material radiactivo utilizado:

- i. Abierto: fácilmente dispersable, habitualmente en forma líquida.
 - ii. Sellado o sólido: baja dispersión al presentarse en forma sólida o contenido en otro material.
- 2. Proceso de utilización del material radiactivo:
 - i. In vivo: el radioisótopo se suministra al paciente.
 - ii. In vitro: se utiliza una muestra tomada del paciente y se analiza en laboratorio.
 - iii. Radiotrazado: previa extracción de un fluido del paciente éste se marca con material radiactivo y es reincorporado al paciente.
- 3. Objetivo de la aplicación del material radiactivo:
 - i. Diagnóstico: se busca la verificación de un parámetro para valorar la existencia de una enfermedad.
 - ii. Terapia: su finalidad es la curación de una enfermedad o la aplicación de un tratamiento paliativo.
 - iii. Otros objetivos no directamente relacionados al paciente como calibración de equipos.

Las subdivisiones presentadas en los criterios anteriores son para el caso particular de aplicaciones de material radiactivo a la medicina, dentro de éstos hay algunos que no serán considerados en este trabajo, al tratarse de aplicaciones de la medicina que no pertenecen al área de medicina nuclear.

A continuación se describen los grupos de técnicas que serán empleados en este trabajo, ya que éste está enfocado al área de medicina nuclear solamente se manejará el grupo de fuentes abiertas, dentro de éstas se hacen las siguientes distinciones:

Técnicas de diagnóstico

Técnicas in vitro: Se busca la determinación de la concentración de ciertos compuestos presentes o que intervienen en el metabolismo humano, son técnicas capaces de detectar cantidades muy pequeñas de sustancias como hormonas, neuropéptidos, vitaminas, drogas, virus y marcadores tumorales. Se utilizan radioisótopos de emisión beta como ^3H y ^{14}C que tienen la ventaja

de estar presentes en las moléculas orgánicas, lo que permite su introducción sin afectar su estructura molecular, por otra parte, deben ser contados en solución con centelleadores líquidos, mientras los emisores gamma son más prácticos al no requerir preparaciones laboriosas para los contajes. También se pueden usar radioisótopos de emisión gamma como ^{125}I y ^{57}Co .

Técnicas in vivo: Son técnicas no invasivas en las que se busca determinar el estado de diferentes órganos y sistemas del cuerpo humano por medio de la incorporación al organismo de un elemento radiactivo. Dicha incorporación puede ser vía intravenosa, intradérmica, por ingestión o inhalación, el radionúclido se deposita temporalmente en ciertos órganos o sistemas de forma selectiva en función de la naturaleza química de la sustancia a la que se incorpora el elemento radiactivo y se hace el seguimiento de la sustancia radiactiva por medio de gammacámaras o detectores de ionización tipo sonda. Los radioisótopos utilizados son principalmente emisores gamma de vida media corta, como el $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{111}In , ^{123}I y otros, con actividades en el rango de MBq. También se pueden utilizar emisores de positrones como el ^{18}F para PET. Estas técnicas permiten realizar exploraciones de cardiología, endocrinología, gastroenterología, hematología, nefrourología, neumología, neurología, osteoarticulares, vasculares, oncológicas y enfermedades infecciosas y autoinmunes.

Radiotrazado: Las muestras autólogas son células hematológicas del paciente (leucocitos, hematíes y plaquetas), obtenidas de sangre que unidas al radiofármaco sirven para determinar su cinética y visualizar su distribución en el interior del organismo, las muestras son reincorporadas al paciente una vez marcadas. Los resultados se obtienen visualizando una imagen a través de la gammacámara o realizando un contaje con un detector externo con sonda o contador gamma. Los isótopos utilizados en estos estudios son el $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{51}Cr , ^{111}In , etc.

Técnicas de terapia

Consisten en impartir una dosis de radiación al tejido a tratar, evitando en lo posible la irradiación de tejidos y órganos sanos o de especial sensibilidad, para fines de caracterización se pueden clasificar en dos tipos:

Metabólicas: Se basan en la acumulación del radionúclido en el órgano o región a tratar, depositándose la dosis en el mismo conforme se metaboliza. Para patologías tiroideas se utiliza el ^{131}I por vía oral, este radionúclido también se utiliza para patologías no tiroideas, como los neuroblastomas, en

que se administra por vía intravenosa por dos días consecutivos. Además se utilizan otros radioisótopos, como el ^{153}Sm y ^{89}Sr para tratamiento paliativo del dolor de las metástasis óseas.

No metabólicas: El tratamiento se hace por medio de la inserción del radionúclido en el interior de la lesión, usualmente se trata de lesiones articulares. Se utilizan emisores beta puros, como el ^{90}Y .

4.3.2. Métodos de medición en medicina nuclear

El método a utilizar para medir la actividad no es único, de modo que se puede realizar dicha medición mediante distintas técnicas, independientemente de la técnica que se utilice se deben considerar la respuesta del detector y la geometría del material. Los métodos se clasifican en directos e indirectos, en esta sección enumeramos los equipos y técnicas indirectas de medida, así como los distintos desechos que se pueden medir con cada uno.

Los métodos directos consisten en la determinación experimental de la actividad del desecho con la ayuda de equipos de detección, se busca que estos equipos sean los propios de un servicio de medicina nuclear, de modo que no sea necesario invertir en más equipo. Los equipos que se pueden utilizar y los distintos desechos que se pueden caracterizar con cada equipo son:

- Activímetros o calibradores de dosis: se pueden utilizar para medir desechos como jeringas, agujas o viales.
- Contadores de centelleo sólido: sirven para medir puntas de pipeta, tubos, líquidos acuosos provenientes de lavados y decantaciones.
- Contadores de centelleo líquido: se pueden medir soluciones y filtros en viales con líquidos de centelleo, así como líquidos orgánicos.
- Analizadores multicanal: se pueden medir puntas de pipeta, jeringas, tubos de ensayo y papeles de frotis.
- Detectores de contaminación superficial: se pueden medir guantes, ropa, papeles de filtro o secante vasos, etc.

Los métodos indirectos consisten en la estimación de la actividad a partir de medidas sobre otro tipo de material. Dichos métodos pueden ser:

- Por diferencia entre la actividad utilizada y la actividad original del vial comercial, considerando el decaimiento posterior, sirve para calcular la actividad de un vial con restos de producto.
- Por decaimiento de la actividad original del vial comercial, sirve para calcular la actividad de un vial caducado.
- Por medida de la tasa de dosis en contacto con equipo portátil de medida de la radiación y cálculo de la actividad mediante modelización del contenido y la fluencia de radiación.

Capítulo 5

Metodología para la caracterización radiológica.

5.1. Procedimiento general para el estudio de una técnica.

Para hacer una adecuada caracterización de las distintas técnicas existentes en la medicina nuclear es necesario contar con cierta información, la cual es enumerada a continuación [5]:

- Datos del producto radiactivo: aquí se indica el compuesto químico, el radionúclido y se da información adicional como cantidad, concentración y otros riesgos asociados.
- Preparación del producto radiactivo: en esta parte se describen todas las operaciones físicas y químicas a realizar con el material radiactivo recibido, hasta la obtención de la parte que se emplea en la técnica. Se debe considerar la generación de los residuos radiactivos durante el proceso.
- Protocolo: en esta sección se debe describir paso a paso el proceso de utilización del material radiactivo, así como los residuos radiactivos generados en cada parte del proceso y las características de los mismos como son una breve descripción del residuo (papeles, tubos de vidrio, viales, celulosa, guantes, líquidos acuosos, etc.), tipo de residuo (líquido, sólido, gaseoso, etc.) y la actividad.

- Equipos a utilizar en la técnica y equipos disponibles para la caracterización radiológica de los residuos radiactivos generados (detectores de radiación, equipo de espectrometría, etc.).

Una vez que se cuenta con esta información se procede a la caracterización de los residuos generados en cada paso de los establecidos en el protocolo, considerando su volumen y masa y se establecen condiciones para la segregación de dichos residuos. Para la medición de la actividad de los residuos se recomienda hacer uso de los equipos ya existentes en el servicio, usando como apoyo los ya establecidos en el apartado “Métodos de medición en medicina nuclear”, de esta tesis. Es necesario hacer una correcta segregación de los residuos conforme estos se generan y es recomendable hacer la caracterización al momento de generación del residuo.

Ya que se cuente con la información obtenida de la caracterización, es recomendable llevar un registro en el que se incluyan [5]:

1. Descripción breve del residuo radiactivo.
2. Tipo de residuo (sólido, líquido, biológico, etc.).
3. Actividad específica o concentración de actividad.
4. Volumen total generado para cada tipo y actividad específica.
5. Peso total del bulto de desechos radiactivos.
6. Gestión prevista, ya sea dispensa, dispensa previo decaimiento o gestión como desecho radiactivo, previa autorización de la C.N.S.N.S. para los casos de dispensa.

Se debe decidir el número de muestras y medidas a realizar, con la finalidad de extrapolar los resultados de las medidas a la técnica, eliminando así la necesidad de hacer la caracterización a cada desecho generado en la aplicación de la técnica en estudio, para esto se deben considerar la repetitividad y reproducibilidad de las medidas.

La expresión de los resultados en términos de porcentaje de la actividad residual respecto de la actividad inicial permite asignar una actividad a las corrientes de desechos establecidas, generadas en un período de tiempo determinado, ya que se conoce la actividad inicial aplicada en dicho período.

Los resultados de los porcentajes que se obtengan de las técnicas para las corrientes de residuos radiactivos definidas se pueden promediar para obtener el reparto de actividad en los mismos o bien, para designar un valor conservador que las considere a todas. Se debe tomar en cuenta que la suma de porcentajes totales puede no dar el 100 %, de hecho en el caso de medicina nuclear, al tratarse de fuentes abiertas, dicha suma nunca dará el 100 %, ya que la mayor parte de la actividad se queda en el paciente.

Se calcula la actividad residual total por isótopo aplicando los porcentajes específicos de cada corriente de desechos, a partir de la actividad utilizada en el período considerado. A continuación se procede a calcular la concentración de actividad en los desechos generados y por comparación con el nivel de dispensa, se calcula el tiempo de almacenamiento necesario para alcanzar dichos niveles. Esta operación dependerá del nivel de segregación por isótopo, presentándose dos casos:

1. Segregación de los residuos de una corriente por isótopo: es el caso más sencillo, en el que el material residual se encuentra contaminado sólo con un radionúclido, en este caso la concentración de actividad del bulto de residuos es la relación entre la actividad residual y el peso del bulto. Este es el valor que se compara con el nivel de dispensa establecido y en caso de ser mayor se calcula el tiempo de almacenamiento requerido para su cumplimiento de la siguiente manera:

$$t = -\frac{T_i}{\ln 2} * \ln\left(\frac{N_i}{C_i}\right)$$

donde t es el tiempo necesario en almacenamiento, T_i es la vida media del radionúclido, N_i es el nivel de dispensa en Bq/g, C_i es la concentración de actividad del material residual en Bq/g.

2. Mezcla de isótopos: el bulto de residuos está contaminado por más de un radionúclido, en este caso se puede proceder de dos maneras:
 - a. Sumar las actividades residuales de cada isótopo y asignar la actividad total al isótopo con nivel de dispensa más restrictivo, calcular la concentración de actividad por medio de la relación entre actividad total residual y peso del residuo y compararla con el nivel de dispensa más restrictivo. En caso de ser necesario se calcula el tiempo de decaimiento utilizando la vida media más larga de los isótopos contenidos en el residuo.

- b. Calcular la concentración de actividad para cada isótopo y hacer la comparación con los niveles de dispensa para cada uno por separado, de manera que se cumpla la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{N_i} \leq 1$$

donde C_i es la concentración de actividad del isótopo i en Bq/g y N_i es el nivel de dispensa del isótopo i en Bq/g. Si no se cumple esto se calcula el tiempo de decaimiento utilizando la vida media más larga de los isótopos contenidos en el residuo.

5.2. Procedimiento general para el estudio de un grupo de técnicas

Para optimizar los recursos y dado que algunas técnicas, debido al protocolo que se sigue, generan residuos radiactivos con características similares es posible agruparlas, de modo que el trabajo se oriente a la caracterización de las técnicas más representativas y no de cada una de las que se utilicen en medicina nuclear. Los criterios a considerar para la agrupación de las técnicas ya fue explicada en el capítulo anterior.

El procedimiento a seguir para la caracterización de un grupo de técnicas se puede esquematizar en los siguientes puntos:

1. Agrupación de las técnicas: esta clasificación se hace siguiendo los parámetros establecidos en la parte “Criterios de clasificación para los grupos de técnicas” de esta tesis.
2. Estudio del grupo de técnicas: consiste en describir el objetivo principal y el proceso completo que se sigue en la aplicación práctica del grupo de técnicas. Puede entonces identificarse la existencia de procesos secundarios diferentes, lo que produciría un reparto de actividad entre los materiales residuales diferente. Aquí se hace la identificación de las corrientes de residuos existentes, con la finalidad de hacer una adecuada segregación de estos.
3. Técnicas a estudiar (técnicas piloto): como el número de técnicas es muy elevado, se trata de realizar una selección de técnicas dentro del grupo, de manera que sean representativas del mismo. La selección

de técnicas piloto se efectúa atendiendo principalmente a la frecuencia con la que se realizan. Además es lógico incluir técnicas que utilicen diferentes radioisótopos. Es recomendable dentro de un grupo, estudiar aquella técnica que por sus características genere un material residual con mayor actividad específica, y valorar su representatividad en el grupo.

4. Análisis de las etapas del proceso de aplicación: En primer lugar, se realiza un estudio pormenorizado definiendo cada etapa del proceso y los posibles materiales residuales que se generan en cada una de ellas. Dentro de cada etapa y para cada tipo de residuo, se definen las técnicas de medida aplicables para la caracterización de los mismos. Por último, se especifican los parámetros de medida y aproximaciones que se van a utilizar.
5. Definición de características físicas y radiológicas a determinar: para cada tipo de residuo generado se realizan las medidas y/o se registran datos principales como peso, volumen y actividad. Sería deseable ir realizando las medidas directamente sobre los residuos que se van generando en diversas etapas, según se va realizando la técnica y medir con los mismos equipos que se utilizan en las técnicas. Este seguimiento no es posible realizarlo para los residuos producidos por el paciente como consecuencia de la incorporación del producto radiactivo, debido a la dependencia de estos en el comportamiento del paciente. En general se recomienda aplicar criterios razonablemente conservadores para la selección del porcentaje de actividad a utilizar en el cálculo.
6. Número de muestras y medidas a realizar: depende del grupo de técnicas y del número de materiales generados. No obstante se tienen que considerar los aspectos de repetitividad y reproducibilidad de las medidas para poder extrapolar los resultados al grupo correspondiente.
7. Expresión y análisis de resultados: la expresión de los resultados en términos de porcentaje de actividad residual, respecto a la inicial utilizada en las técnicas, es una forma útil para asignar actividad a una cantidad o volumen de residuos generados en un intervalo de tiempo. Como se conoce la actividad de partida del estudio y se ha medido la actividad residual, se calcula el porcentaje que queda de la inicial utilizada. En

general se toma como actividad inicial la actividad prescrita. Así se obtiene en una técnica, cómo se ha producido el reparto de actividad en los diferentes tipos de residuos. Controlando la actividad que se utilice en un período de tiempo y con el reparto porcentual obtenido, se asignaría actividad a las corrientes de residuos establecidas. Con el dato del peso y/o volumen del residuo, se pueden expresar los resultados en términos de concentración de actividad (Bq/g y/o Bq/l).

No obstante, puesto que inicialmente los desechos van separados por grupos y a su vez por corrientes y además se da la circunstancia de que el nivel de dispensa coincide para bastantes isótopos, se simplifica en gran medida el problema. En estos casos, el cálculo de la concentración de actividad se haría directamente con la relación de la actividad residual total y el peso. El cálculo del tiempo de almacenamiento, si fuera necesario, se realizaría con la vida media más larga.

Previamente a la dispensa de cualquier material residual se realizará un control radiológico con los criterios y equipos de medida establecidos, que aseguren que no se incluye en él desechos radiactivos. Se mantendrá especial atención en realizar estos controles radiológicos finales en lugares sin influencias de otras fuentes de radiación. En estos casos se hace necesaria una buena caracterización del fondo del lugar de medida.

Conclusiones

Se espera que este trabajo sirva como base para desarrollar los procesos que permitirán caracterizar los residuos radiactivos generados en cada una de las técnicas utilizadas en la medicina nuclear, aprovechando hasta donde sea posible los recursos de medición con que se cuentan para la aplicación de las técnicas, lo que permita a su vez mejorar la toma de decisiones en cuanto a la gestión de los residuos y el cumplimiento con la normativa establecida al respecto.

Aún es necesario aplicar la metodología presentada en este trabajo a las técnicas de medicina nuclear y comparar los resultados con los niveles de dispensa existentes en el país.

Una herramienta que puede facilitar el desarrollo de las metodologías para la caracterización radiológica de los residuos radiactivos en los términos que lo requiere la normativa, es la elaboración de un manual de técnicas de medicina nuclear aplicables en México, lo que permitirá estandarizar la aplicación de dichas técnicas en las instalaciones de medicina nuclear del país, facilitando y dando mayor certidumbre a los procesos que se hayan desarrollado para la caracterización de los residuos radiactivos en medicina nuclear que se obtendrán a partir del análisis de dicho manual y permitiendo incluso la publicación de resultados de la aplicación de esta metodología que sirvan de directriz a los servicios de medicina nuclear que sigan el manual antes mencionado.

En este trabajo se recomienda hacer una agrupación de técnicas y una selección de las técnicas más significativas en cada grupo, sin embargo, es posible hacer el procedimiento para cada técnica, haciendo la asignación de porcentajes entre las distintas corrientes de desechos generadas para la técnica bajo estudio. Entre los resultados esperados al aplicar este método se relaciona la tasa de dosis medida a contacto con el tiempo de almacenamiento requerido para su dispensa.

La aplicación de esta metodología no es aplicable a las excretas de pacientes, ya que la actividad residual en este caso depende del comportamiento del paciente, con lo cual no es posible asignarle un porcentaje de la actividad inicial a estos residuos y es necesario hacer la caracterización cada vez que el desecho sea generado.

Sería recomendable la publicación de una norma o la adecuación de la NOM-035-NUCL-2000 que incluya el escenario particular de aplicaciones médicas, tomando como base el IAEA-TECDOC-1000.

Glosario

Absorción: proceso por el cual iones, átomos o moléculas son retenidas en un volumen.

Actividad: el número de transiciones espontáneas que ocurren por unidad de tiempo en una cantidad dada de material radiactivo. Formalmente se define $A = \frac{dN}{dt}$ donde dN es el número de transiciones espontáneas que ocurren en el intervalo dt . La unidad en el SI es el becquerel (Bq) y $1 \text{ Bq} = 1 \text{ des/s}$, otra unidad comúnmente utilizada es el Curie (Ci) y se tiene $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ des/s}$.

Actividad específica: actividad contenida por unidad de masa (Bq/g).

Actividad superficial: actividad contenida en una superficie y debida a contaminación.

Adsorción: proceso por el cual iones, átomos o moléculas son retenidas en la superficie de un material.

Almacenamiento definitivo: aislar de manera permanente los desechos radiactivos del ambiente accesible al hombre, teniendo en cuenta las cadenas alimenticias.

Almacenamiento temporal: es el almacenamiento de los desechos radiactivos en una instalación controlada, que brinda protección al personal, la población y al ambiente, y de la que serán posteriormente recuperados.

Caracterización: estudio y determinación de las propiedades físicas, químicas y radiológicas de un material, que permiten determinar las necesidades para su adecuado manejo.

Caracterización de residuos radiactivos: estudio y determinación de las propiedades físicas, químicas y radiológicas de un residuo radiactivo, que permiten determinar las necesidades para su adecuado manejo, pretratamiento, tratamiento, acondicionamiento y almacenamiento temporal y definitivo, de tal forma que esto garantice que tanto las actividades que se realicen para su gestión como la forma final del desecho radiactivo cumplen con la normativa aplicable y en consecuencia no representan riesgos inaceptables para nuestra sociedad.

Concentración de actividad: actividad contenida por unidad de volumen (Bq/m^3 o Bq/l).

Descarga: liberación controlada y planeada de gases o líquidos radiac-

tivos al ambiente, que debe ser congruente con los límites establecidos en la NOM-006-NUCL-1994, Criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos del público.

Desecho radiactivo: material que contiene o está contaminado con isótopos radiactivos con una actividad o una concentración de actividad superiores a los establecidos por el órgano regulador y que no tiene ningún uso previsto.

Dispensa: las fuentes, inclusive sustancias, materiales u objetos, adscritas a prácticas notificadas o autorizadas podrán ser liberadas del cumplimiento en lo sucesivo de los requisitos prescritos por las normas, siempre que se ajusten a los niveles de dispensa aprobados por la autoridad reguladora. Estos niveles de dispensa deberán tener en cuenta los criterios de exención especificados.

Dispensa condicional: el residuo se libera de control regulador y es declarado como residuo convencional a partir de niveles obtenidos a partir de escenarios particulares.

Dispensa incondicional: el residuo se libera de control regulador y es declarado como residuo convencional a partir de los niveles publicados en la normativa correspondiente.

Efluentes: materiales radiactivos líquidos o gaseosos que son descargados al ambiente.

Exclusión: se considera excluida de control regulador a toda exposición que por su naturaleza no pueda ser susceptible a dicho control, como por ejemplo la exposición por ^{40}K existente en el cuerpo humano, una práctica podrá ser liberada de control regulador si cumple con los requisitos del órgano regulador nuclear.

Exención para fuente: una fuente podrá ser liberada de control regulador nuclear si cumple con los requisitos del órgano regulador en la materia.

Floculación: agregación de partículas sólidas en una dispersión coloidal, en general por la adición de algún agente.

Fuente: cualquier cosa que pueda causar exposición a la radiación, bien emitiendo radiación ionizante o liberando sustancias o materias radiactivas. Por ejemplo, las materias que emiten radón son fuentes existentes en el medio ambiente; una unidad de esterilización por irradiación gamma es una fuente adscrita a la práctica de conservación de alimentos por medio de la radiación; un aparato de rayos X puede ser una fuente adscrita a la práctica de radiodiagnóstico, y una central nuclear es una fuente adscrita a la práctica de generación de energía nucleoelectrónica. A los efectos de la aplicación de las

normas puede considerarse, cuando corresponda, que una instalación completa o múltiple situada en un lugar o emplazamiento es una sola fuente.

Fuente abierta: todo material radiactivo que durante su utilización puede entrar en contacto directo con el ambiente.

Fuente sellada: material radiactivo permanentemente incorporado a un material encerrado en una cápsula hermética, con resistencia mecánica suficiente para impedir el escape o la dispersión del material radiactivo en las condiciones previsibles de utilización y desgaste.

Gestión de desechos: realizar todas las actividades administrativas y operacionales necesarias para el manejo, pretratamiento, tratamiento, acondicionamiento, transporte, almacenamiento y disposición de los desechos radiactivos.

Instalaciones radiactivas: son aquéllas en las que se producen, fabrican, almacenan o usan fuentes radiactivas o dispositivos generadores de radiación ionizante, o en las que se tratan, acondicionan o almacenan desechos radiactivos.

Material radiactivo: cualquier material que contiene uno o varios radionúclidos que emiten espontáneamente partículas o radiación electromagnética, o que se fisian espontáneamente.

Medicina nuclear: rama de la medicina que consiste en la administración de fuentes abiertas en pequeñas cantidades.

Mena: mineral del que se puede extraer un elemento, un metal generalmente, por contenerlo en cantidad suficiente para ser aprovechado.

Niveles de dispensa: conjunto de valores establecido por el órgano regulador de un país, expresado en función de las concentraciones de actividad y/o las actividades totales, que constituyen el máximo dentro del cual o bajo el cual las fuentes de radiación pueden liberarse de control regulador nuclear.

PET: tomografía por emisión de positrones, es una técnica de diagnóstico invivo que sirve para la detección del cancer, evaluar los efectos de un ataque al corazón, evaluar el flujo de sangre al corazón, entre otras cosas.

Práctica: cualquier actividad humana autorizada por el órgano regulador que utiliza fuentes de radiación ionizante.

Radionúclido: es un átomo cuyo núcleo es inestable debido a su proporción de neutrones a protones; por lo tanto, dicho núcleo al tender hacia el equilibrio emitirá radiación en forma de ondas o partículas.

Radionúclidos de vida media corta: son aquéllos cuya vida media es menor a 30 años, incluyendo al Cesio-137.

Radionúclidos de vida media larga: son aquéllos cuya vida media es mayor a 30 años, excluyendo al Cesio-137.

Radiotoxicidad: es la capacidad de un radionúclido para producir una lesión en virtud de sus emisiones radiactivas, cuando es incorporado al cuerpo.

Radiotrazado: estudio de medicina nuclear que consiste en marcar una hormona, enzima u otra sustancia con algún elemento radiactivo y administrar dicha sustancia al paciente, y mediante sistemas de detección adecuados se sigue la distribución del radionúclido en el organismo y se obtienen imágenes.

Residuo: material que después de haber sido producido, manipulado o utilizado no tiene valor alguno para el proceso que lo generó.

Vida media: tiempo que tarda una muestra de un radionúclido específico en decaer a la mitad de su actividad, sin importar la actividad inicial o la cantidad del radionúclido con que se cuente.

Bibliografía

- [1] Reglamento General de Seguridad Radiológica. 1988.
- [2] Classification of Radioactive Waste. IAEA Safety Series 111-G-1.1. 1994.
- [3] Management of Radioactive Waste From the Use of Radionuclides in Medicine. IAEA TECDOC 1183. 2000.
- [4] Principios Fundamentales de Seguridad. IAEA Nociones Fundamentales de Seguridad SF-1. 2007.
- [5] Principios para la Gestión de Desechos Radiactivos. IAEA Colección de Seguridad 111-F. 1994.
- [6] Guía Técnica de Gestión de Materiales Residuales con Contenido Radiactivo Procedentes del Ámbito Sanitario. SEPR. España 2002.
- [7] NOM-035-NUCL-2000, Límites para Considerar un Residuo Sólido como Desecho Radiactivo.
- [8] NOM-004-NUCL-1994, Clasificación de los Desechos Radiactivos.
- [9] NOM-028-NUCL-2009, Manejo de Desechos Radiactivos en Instalaciones Radiactivas que utilizan Fuentes Abiertas.
- [10] Gestión Previa a la Disposición Final de Desechos Radiactivos, Incluida la Clausura. Requisitos. IAEA Colección de Normas de Seguridad WS-R-2.
- [11] Piña Lucas, Gabriel. Caracterización Radiológica No Destructiva. Curso de Caracterización de Residuos Radiactivos, CIEMAT. España. 2007.

- [12] Leganés, José Luis. Factores de Escala. Curso de Caracterización de Residuos Radiactivos, CIEMAT. España. 2007.
- [13] Rodríguez Alcalá, Marina. Técnicas Destructivas. Curso de Caracterización de Residuos Radiactivos, CIEMAT. España. 2007.
- [14] Rodríguez Alcalá, Marina. Separaciones Radioquímicas. Curso de caracterización de Residuos Radiactivos, CIEMAT. España. 2007.
- [15] NOM-018-NUCL-1995, Métodos para Determinar la Concentración de Actividad y Actividad Total en los Bultos de Desechos Radiactivos.
- [16] Guía de Gestión de Material Radiactivo en Instituciones Médicas y Laboratorios de Investigación Biológica. SEPR. España 1996.

Páginas web

- [I] www.historiasdelaciencia.com/?p=392
- [II] www.healthsystem.virginia.edu/uvahealth/adult_radiology_sp/nucmed.cfm