

## Aspectos técnicos de seguridad en la disposición de fuentes radiactivas selladas en desuso

Mario Mallaupoma\*

Dirección de Servicios, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

### Resumen

Las fuentes radiactivas selladas tienen un amplio uso en la industria, la medicina, la investigación científica y otras aplicaciones. Estas fuentes radiactivas cumplidas su vida útil constituyen desechos radiactivos cuya disposición deben ser gestionadas en forma segura. Teniendo en cuenta sus características peligrosas, resulta un trabajo muy especializado, desarrollar la construcción de un repositorio sobre todo para las fuentes que tienen un largo período de desintegración. Las opciones de disposición a nivel geológico, resultan ser muy costosas, teniendo en consideración el número reducido de fuentes radiactivas selladas en desuso, en los países en vías de desarrollo. En el presente trabajo se realiza el análisis de los aspectos técnicos a tener en cuenta en la disposición de las fuentes radiactivas en desuso, a nivel de superficie o a poca profundidad, considerando un repositorio de construcción simple y económica que permita cumplir con las exigencias de seguridad radiológica requeridas por las normas nacionales y recomendaciones internacionales.

**Palabras claves:** Fuente sellada, Accidente radiológico, Disposición, Repositorio

### Abstract

Sealed radioactive sources are widely used in industry, medicine, scientific research and other applications. These radioactive sources are considered as radioactive waste, after they comply with their useful lives and they must be managed in a safely way since their origin till their final disposal. Taking into account their variable characteristics it is necessary to implement and develop a very specialized job in order to show that they will not produce an unacceptable risk for people and their environment. There are many options for their disposal, however they are very costly. In this paper, taking into account the production of a small amount of disused sealed sources, it is analyzed the option for their disposal near the surface, considering constructions of low deep repository, which are simple and inexpensive and the compliance with radiation safety requirements stated by national and international recommendations.

**Keywords:** Sealed radioactive source, Radiological accident, Disposal, Repository

### 1. Introducción

Las fuentes radiactivas selladas son dispositivos de gran valor en múltiples aplicaciones industriales, médicas, productos de consumo e investigación, es por ello que su uso sigue creciendo a nivel mundial; sin embargo, las fuentes selladas suelen tener dimensiones pequeñas, generalmente son objetos brillantes, lo cual hace que fácilmente se puedan confundir con piezas de maquinarias, que podría conllevar a un gran riesgo y generación de accidentes en personas sin conocimiento sobre su naturaleza y riesgos asociados.

Aunque no son comunes los casos de accidentes radiológicos originados con fuentes selladas, varios de ellos han causado daños materiales importantes y también produjeron, la muerte de personas expuestas [1].

Estos dispositivos tienen una vida útil que van desde pocos años hasta miles de años y en casi todos los casos, todavía mantienen radiactividad suficiente como para causar efectos perjudiciales a la salud cuando son retirados de servicio y se convierten en desechos radiactivos por lo que requieren una gestión especializada en su disposición [2].

Todo país que utiliza fuentes radiactivas selladas debe analizar las alternativas disponibles o potenciales para la disposición de las fuentes radiactivas selladas en desuso, consideradas como desechos radiactivos, teniendo en cuenta una serie de parámetros como son aspectos de seguridad, recursos financieros y otras medidas complementarias. Todo ello debe de estar considerado dentro de

\* Correspondencia autor: [mmallaupoma@ipen.gob.pe](mailto:mmallaupoma@ipen.gob.pe)

la política y estrategia nacional de gestión de residuos radiactivos. En caso de accidentes radiológicos ese tipo de fuentes producirían un impacto negativo importante desde el punto de vista social, económico y ambiental.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) clasifica a los repositorios como instalaciones cerca de la superficie e instalaciones subterráneas, pero no indica los criterios de clasificación en términos de profundidad. En la Figura 1 puede visualizarse una serie de fuentes radiactivas en desuso, consideradas como desechos radiactivos, producidos en el Perú.



Figura 1. Fuentes radiactivas selladas en desuso.

## 2. Metodología

Se realiza un análisis simplificado de seguridad, basado en conceptualizar eventos, definir factores y fenómenos a considerar en la evaluación. Luego, se representan los eventos, formulando las herramientas matemáticas para mostrar los fenómenos y factores identificados y sus correspondientes interacciones.

La hipótesis del presente trabajo también considera que el material a disponer en los repositorios son fuentes selladas en desuso que serán retiradas de sus blindajes originales y colocadas en cápsulas de acero inoxidable. De igual manera, se identifica un inventario de referencia de las fuentes radiactivas a disponer, para países en vías de desarrollo que solo cuentan con aplicaciones de fuentes selladas en las múltiples aplicaciones de la tecnología nuclear. Algunas de estas se muestran en la Tabla 1. De igual manera, se considera que los eventos que conllevan a exposición ocurren determinísticamente, con posterioridad al control institucional y que se extiende por un período entre 100 y 300 años.

Tabla 1. Inventario de fuentes selladas en desuso.

Radio nucleido	Actividad (Bq)	Nº Fuentes	Actividad Media	Actividad Modal
Co-60	7,00E+15	105	7,00E+13	1,00E+10
Sr -90	3,00E+11	41	8,00E+09	8,00E+08
Cs-137	2,00E+15	433	4,00E+12	5,00E+09
Ra-226	2,00E+12	704	2,00E+09	7,00E+07
Am-241	3,00E+13	251	1,00E+11	8,00E+07
Fe-55	3,00E+09	1	3,00E+09	

En el modelo analizado se considera que la exposición de las personas se produce principalmente por la intrusión a la instalación, por lo que las situaciones que llevan a una exposición no son afectadas por las características del terreno, de los cuerpos de agua y por las poblaciones de las especies vegetales y animales del local o de la región. La hipótesis de intrusión humana en la instalación, considera que se produce sin que sea percibido los peligros presente en la estructura invadida.

La hipótesis de que el evento ocurra luego de haber cesado el control institucional es restrictiva, ya que en este momento las actividades de las fuentes involucradas y sus posibles efectos radiológicos son máximas; por lo tanto, el sistema de disposición puede ser caracterizado únicamente por la descripción de la instalación.

La secuencia inicial del evento que conlleva a la exposición por irradiación externa es la siguiente:

- Ejecución de movimientos de tierra para construcción pública o privada.
- Destrucción de parte o todo el cubículo donde están depositados las fuentes.
- Daño o destrucción de los contenedores.

En el escenario postulado se produce irradiación por exposición externa; asimismo, contaminación del agua potable, alimentos y posterior ingestión del material radiactivo. Otro escenario posible considera una serie de eventos que produce daño al bulto, dispersión e inhalación del material radiactivo.

Aunque no es objeto de este estudio, La evaluación de las probabilidades de eventos iniciadores y las secuencias de los eventos postulados deben discutir la justificación de los escenarios propuestos en términos de

posibilidad de ocurrencia de estos eventos y su importancia en términos radiológicos.

Se excluye a los fenómenos naturales como medios que pudieran dispersar los radionucleídos en la biósfera debido a que las fuentes radiactivas se encuentran encapsuladas con materiales resistentes mecánica y químicamente.

Los escenarios de intrusión considerados guardan relación con los aspectos de seguridad, en lo que se refiere a las dosis de personal resultante de las exposiciones, teniendo en cuenta que las secuencias de eventos propuestos son consistentes con los numerosos accidentes reales que han involucrado fuentes selladas.

Si bien tales escenarios son poco probables, el exceso de rigurosidad es contrapesado por la hipótesis de duración del control institucional, que puede ser considerado en forma optimista para un valor de 300 años.

La representación matemática de los modelos de cálculo, en el caso del presente estudio, es simple debido a los escenarios de exposición.

El cálculo de la dosis absorbida, como consecuencia de la exposición externa de las fuentes, se realiza a partir de los coeficientes de exposición externa de cada radionucleído y de la actividad de las fuentes, y para los pares de valores de distancia de la persona a la fuente así como del tiempo de exposición. Los resultados se comparan con los límites de dosis y con el valor de dosis restringida [3]. Se consideraron dos escenarios para la exposición externa:

La exposición a una fuente a una distancia de 1 metro por 1 hora (escenario 1), simulando una situación en la que un individuo está trabajando en forma inadvertida en el lugar donde se encuentra el repositorio, cuando los contenedores ya han sido dañados.

La exposición a una fuente a una distancia de 5 centímetros por 8 horas (escenario 2), simulando la situación en la que una persona encuentra una fuente que ha sido retirada de su contenedor y luego se lo guarda en un bolsillo de su vestimenta.

La expresión matemática utilizada para calcular la irradiación externa es:

$$D_i^{ext}(t) = \frac{A_i}{N_i} e^{-\lambda_i t} \times \frac{\Gamma_i \lambda T}{d^2}$$

Donde:

$D_i^{ext}(t)$  = es la dosis absorbida por exposición a la radiación externa de una fuente con una actividad media o modal del inventario de las fuentes del radionucleído i.

$A_i$  = es la actividad inicial del radionucleído i en el inventario de las fuentes selladas

$N_i$  = es el número de las fuentes del inventario del radionucleído i.

$\lambda_i$  = es la constante de decaimiento del radionucleído i.

$t$  = es la fecha en que ocurre la intrusión en el repositorio, fijada en 100, 200 y 300 años, a partir del presente.

$\Gamma_i$  = es la tasa de dosis, para la irradiación externa, del radionucleído i.

$T$  = es el tiempo de exposición, y

$d$  = es la distancia entre el individuo expuesto y la fuente.

Los cálculos de la dosis potencial por ingestión (escenario 3) y por inhalación (escenario 4) se realizan a partir de las actividades de cada radionucleído contenidos en las fuentes y de los factores dosimétricos de cada radionucleído por ingestión y por inhalación, para un grupo de individuos del público del grupo de edad pertinente, publicado por el OIEA [4].

El resultado del cálculo de la dosis potencial efectiva se compara con el valor de la dosis restringida, adoptado como criterio de protección radiológica.

Las expresiones matemáticas utilizadas para calcular las dosis potenciales tanto por ingestión como por inhalación son:

$$D_i^{ing}(t) = \frac{A_i}{N_i} e^{-\lambda_i t} \times \lambda T \Gamma_i^{ing}$$

$$D_i^{inh}(t) = \frac{A_i}{N_i} e^{-\lambda_i t} \times \lambda T \Gamma_i^{inh}$$

Donde :

$D_i^{ing}$  y  $D_i^{inh}$  = Son las dosis potenciales por ingestión y por inhalación del radionucleído i.

$F_i^{ing}$  y  $F_i^{inh}$  = Son los factores dosimétricos para la ingestión e inhalación, respectivamente para el radionucleído  $i$ .

Los factores dosimétricos utilizados resultan ser los valores de la dosis comprometida efectiva potencialmente recibidas por la persona expuesta. El adjetivo "potencial" colocada en la dosis se debe al hecho de que las dosis calculadas representan el valor que resultaría de la ingestión o inhalación de toda la actividad presente en una fuente, escenario poco probable bajo cualquier circunstancia. A continuación se muestran algunas tablas con los resultados obtenidos, para diferentes escenarios.

**Tabla 2.** Dosis potenciales debido a exposición externa a 1 m por 300 años.

Radionucleído	Ai (Bq)	Dosis Media (Sv)	Dosis Modal (Sv)
Co-60	7.E+15	2.14E-16	5.16E-19
Sr -90	3.E+11	0.00E+00	0.00E+00
Cs-137	2.E+15	3.29E-04	4.77E-06
Ra-226	2.E+12	4.51E-04	6.17E-05
Am-241	3.E+13	1.99E-04	1.56E-07
Fe-55	3.E+09	0.00E+00	

**Tabla 3.** Dosis potencial - exposición externa a 5 cm por 300 años.

Radio nucleído	Ai (Bq)	Dosis Media (Sv)	Dosis Modal (Sv)
Co-60	7.E+15	6.86E-13	1.65E-15
Sr -90	3.E+11	0.00E+00	0.00E+00
Cs-137	2.E+15	1.05E+00	1.53E-02
Ra-226	2.E+12	1.44E+00	1.97E-01
Am-241	3.E+13	6.38E-01	5.01E-04
Fe-55	3.E+09	0.00E+00	00

**Tabla 4.** Dosis potencial por ingestión a 300 años.

Radio nucleído	Ai (Bq)	Dosis Media (Sv)	Actividad Modal (Sv)
Co-60	7.E+15	9.99E-12	2.40E-14
Sr -90	3.E+11	1.05E-02	2.82E-03
Cs-137	2.E+15	3.55E+01	5.14E-01
Ra-226	2.E+12	1.25E+03	1.72E+02
Am-241	3.E+13	1.34E+04	1.06E+01
Fe-55	3.E+09	7.37E-34	0.00E+00

**Tabla 5.** Dosis potencial por inhalación a 300 años.

Radio nucleído	Ai (Bq)	Actividad media (Sv)	Actividad Modal (Sv)
Co-60	7.E+15	3.47E-11	8.33E-14
Sr -90	3.E+11	6.93E-03	1.86E-03
Cs-137	2.E+15	2.59E+02	3.75E+00
Ra-226	2.E+12	3.84E+04	5.26E+03
Am-241	3.E+13	1.34E+06	1.06E+03
Fe-55	3.E+09	8.67E-34	0.00E+00

### 3. Resultados y Discusión

En el caso de la dosis recibida por intrusión, en la Tabla 2 se puede apreciar que para el escenario 1 de exposición por una hora y a una distancia de 1 metro la mayor dosis se debería a la presencia del Cesio-137 a 100 y 200 años de decaimiento mientras que el cobalto-60 solo tendría una contribución a 100 años de decaimiento, comparando con los valores de dosis obtenidos con las restricciones de protección radiológica indicadas en el ICRP.

En el caso del escenario 2, exposición de 8 horas a una distancia de 5 cm. Los elementos radiactivos que no podrían disponerse en superficie serían los radionucleídos de mayor periodo de semidesintegración, como es el caso de Cesio-137, Radio-226 y Americio-241. Excederían las restricciones de dosis consideradas a 100, 200 y 300 años.

En el caso del escenario 3 dosis por ingestión se puede observar que tienen una incidencia los radioisótopos con largo período de semidesintegración, como son los casos de Cesio-137, Estroncio-90, Radio-226 y Americio-241. En el escenario 4, dosis por inhalación se puede observar un comportamiento similar al escenario 3.

De los resultados obtenidos, queda definido que los radioisótopos de mayor período de semidesintegración como el Cesio-137, Radio-226 y Americio-241 no pueden ser dispuestos a nivel de superficie por lo que se tendría que considerar quizás opciones de disposición a poca profundidad.

### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que en el caso de los radioisótopos de corto o mediano

período de semidesintegración, la disposición de las fuentes radiactivas selladas a nivel de superficie puede ser viable; sin embargo, la situación resulta discutible para el caso de los radioisótopos de largo período de semidesintegración si se tiene en cuenta los valores restrictivos de dosis recomendados por el ICRP.

La opción de disponer las fuentes radiactivas selladas en desuso en construcciones poco profundas entre 50 a 100 m, debido a la alta actividad específica de las fuentes radiactivas, sus períodos de semidesintegración y desde luego, dependiendo de las características hidrogeológicas, geofísicas, hidráulicas del lugar del posible emplazamiento, resultaría ser la práctica más adecuada, para los países en vías de desarrollo que tienen aplicaciones de la tecnología nuclear, pero que no cuentan con reactores nucleares de potencia.

Lo más probable es que el repositorio utilice el concepto multibarreras que pueda proporcionar aislamiento físico y químico además de la contención, utilizando el concepto de defensa en profundidad [5].

## 5. Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency. Magnitude of the problem of spent radiation sources. IAEA-TECDOC-620. Vienna: IAEA; 2003.
- [2] Mallaupoma M, Medina E. Seguridad radiológica en el uso de medidores nucleares. Serie Centro Superior de Estudios Nucleares. Lima: Editorial Heta Gráfica; 2009.
- [3] International Commission on Radiological Protection. Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77. Pergamon, Oxford; 1997.
- [4] Organismo Internacional de Energía Atómica. Exposición ocupacional y factores de dosis efectivas por inhalación e ingestión de radioisótopos. Colección Seguridad No. 115. Viena: OIEA; 1997.
- [5] Instituto Peruano de Energía Nuclear. Ley N° 28028. Ley de regulación del uso de fuentes de radiación ionizante. Disponible en URL:  
[http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/normatividad/ley\\_27028.htm](http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/normatividad/ley_27028.htm)