

Evaluación de seguridad radiológica para el transporte terrestre de fuentes categoría 1 (^{60}Co) en virtud de arreglo especial aplicando el método de matriz de riesgo

Application of the risk matrix method for the terrestrial transportation of sources category 1 (^{60}Co) under special arrangement

Yasmín Rosas¹, José Agustín Daza¹

Citación: Y. Rosas y J. A. Daza, “Evaluación de seguridad radiológica para el transporte terrestre de fuentes categoría 1 (^{60}Co) en virtud de arreglo especial aplicando el método de matriz de riesgo”, *Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares* n.º 2, pp. 62-74, 2018.

Recibido: 18 de julio de 2018

Aceptado: 3 de diciembre de 2018

Publicado en línea: 17 de diciembre de 2018

Doi: 10.32685/2590-7468/invapnu-clear.2.2018.53

RESUMEN

El transporte de material radiactivo es una de las prácticas más seguras gracias a la regulación y a las medidas de seguridad y protección radiológica aplicadas. Tal como ocurre en otras prácticas implementadas cuando hay radiaciones ionizantes, también requiere la verificación de los requisitos de seguridad; por eso es determinante una adecuada evaluación de seguridad. En las evaluaciones de seguridad se aplican diferentes metodologías, como, por ejemplo, el método de matriz de riesgo, usado en radioterapia, radiología industrial, medicina nuclear, perfilaje, y por primera vez en el transporte de material radiactivo.

En el marco de la consolidación de desechos radiactivos de alta peligrosidad, en Colombia se identificó la necesidad de confinar las fuentes categoría 1 de ^{60}Co , catalogadas como extremadamente peligrosas, usadas en radioterapia, que deben ser reexportadas o trasladadas para su disposición final. Por las características de las fuentes y el tiempo transcurrido para su gestión, y en virtud de un arreglo especial, se requiere transportarlas en bultos con un nivel total de seguridad, un adecuado control operacional y algunas medidas adicionales.

Teniendo en cuenta la peligrosidad de las fuentes y las características del transporte, era necesario aplicar el método de matriz de riesgo para evaluar la seguridad del transporte terrestre, prestando especial atención a la defensa en profundidad, los análisis cuantitativos y la aplicación de un enfoque diferenciado para el transporte de fuentes de ^{60}Co categoría 1.

La evaluación de seguridad concluyó que, en cualquier caso, como producto de la ocurrencia de sucesos iniciadores, las consecuencias son altas; sin embargo, la robustez de las barreras de seguridad, los reductores de consecuencia y los reductores de frecuencia mantienen la práctica en riesgos bajos.

Palabras clave: Riesgo, seguridad, protección, accidente, material radiactivo.

¹ Importrans Radiactivos Ltda. Cota (Colombia)
Email de correspondencia: yrosasm@unal.edu.co

ABSTRACT

The transport of radioactive material is one of the safest practices thanks to the regulation and to the security measures and radiological protection applied. Like other practices with ionizing radiation, it also requires the verification of safety requirements, which is why an adequate safety assessment is crucial. In the safety evaluations, different methodologies are applied, such as the risk matrix method; the latter is used in radiotherapy, industrial radiology, nuclear medicine, logging, and for the first time for the transport of radioactive material.

In the framework of the consolidation of high dangerous radioactive waste, in Colombia, the need was identified to confine category 1 sources of ^{60}Co categorized as extremely dangerous, used in radiotherapy, which must be re-exported or transferred for final disposal. Due to the characteristics of the sources and the time elapsed for their management, the transport in packages is required by virtue of a special arrangement, packages with a total level of security, adequate operational control and some additional measures.

Taking into account the dangerous nature of the sources and characteristics for transport, it was necessary to apply the risk matrix method to obtain the assessment of safety for land transport, paying special attention to defense in depth, quantitative analysis and the application of a differentiated approach for the transport of ^{60}Co category 1 sources.

The safety assessment concluded that, in any of the cases, as a result of the occurrence of initiating events, the consequences are high, however, the robustness of the safety barriers, the consequence reducers and the frequency reducers maintain the practice at low risks

Keywords: Risk, safety, protection, accident, radioactive material.

1. INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de materiales radiactivos en todo el mundo hace que estos materiales se transfieran del lugar de utilización a la locación del usuario final, o para disposición final, en el caso de las fuentes que ya no van a ser usadas. La cantidad de material que se transporta depende del consumo, y va desde cantidades pequeñas hasta cantidades muy grandes. El transporte es la principal forma en que los materiales radiactivos se transfieren a las instalaciones autorizadas para su uso o la respectiva disposición final. En general, las personas no son conscientes del peligro que representa mover estos elementos peligrosos de un lugar a otro; por lo tanto, se requieren programas de protección radiológica para garantizar que las personas no se vean afectadas durante el transporte de estos materiales [1]. Para transportar material radiactivo es indispensable establecer una serie de medidas de protección y seguridad. Así, deben ser transportados bajo características particulares en contenedores elegidos teniendo en cuenta la forma, cantidad, tipo de material y actividad del radioisótopo. Los contenedores están hechos con plomo, tungsteno u otro material denso que permita atenuar la radi-

ación que producen las fuentes, deben cumplir con una serie de requisitos que asegure tolerancia a algunas situaciones accidentales según el tipo de transporte. Según el Reglamento de transporte del OIEA se denomina bultos al contenedor con el material radiactivo [2], [3].

Se estima que durante medio siglo se han transportado más de 800 millones de curios (Ci) de ^{60}Co de forma segura en más de cincuenta países en el mundo. La base de datos de incidentes radiológicos (Database of Radiological Incidents and Related Events) reporta una serie de eventos que incluyen los accidentes o incidentes importantes. No es una lista completa, ni tampoco es un muestreo uniforme. En particular, se sabe que es incompleta en relación con accidentes médicos e industriales que implican lesiones menores, pero sirve como referente [4].

El transporte de material radiactivo es una de las prácticas más seguras gracias a la regulación y a las medidas aplicadas. Es importante resaltar la responsabilidad de cada país y la cooperación internacional, que promueven y mejoran la seguridad a escala mundial al intercambiar experiencias y mejorar los procedimientos para disminuir los peligros, prevenir accidentes y responder a emergencias.

Las normas internacionales de seguridad brindan apoyo a los Estados para cumplir con sus obligaciones en virtud de los principios generales del derecho internacional, como los relativos a la protección del medio ambiente [3], [1].

El cumplimiento de los requisitos de seguridad en todas las instalaciones y la determinación de las medidas adoptadas para fortalecer la seguridad se consigna en las evaluaciones de seguridad que deben ser documentadas en las instalaciones según la práctica con radiaciones ionizantes. Aquí queda incluido el transporte de material radiactivo. Las evaluaciones de seguridad deben ser verificadas por la autoridad reguladora como parte del proceso de autorización [5], [6].

En Colombia, la Resolución 90874 de 2014 del Ministerio de Minas y Energía, "Requisito y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas", establece la evaluación de seguridad como uno de los documentos requeridos e indispensables para la autorización de la práctica [7].

Uno de los métodos usados para evaluar la seguridad es el método de matriz de riesgo, que ha sido utilizado en distintas áreas, como radiología industrial, radioterapia y perfilaje de pozos, entre otras, debido a su fácil aplicación. Ha sido utilizado también como técnica de mitigación de riesgos en instalaciones de equipos que generan radiaciones ionizantes, como tomógrafos por emisión de positrones (PET), con el fin de garantizar una adecuada exposición [8], [9], [10], [11]. Sin embargo, no suele aplicarse en casos de transporte de material radiactivo, en condiciones en que se tengan en cuenta todas las variables, lo cual incluye el método de matriz de riesgo.

Este artículo explica la aplicación del método de matriz de riesgo para obtener la evaluación de seguridad en el transporte de fuentes categoría 1 de cobalto 60 (^{60}Co), en arreglo especial, que se encuentran en desuso en instalaciones médicas y que fueron usadas en radioterapia, por arreglo especial *se entenderá aquellas disposiciones, aprobadas por la autoridad competente, en virtud de las cuales podrá ser transportada una remesa que no satisfaga todos los requisitos aplicables al transporte de material radiactivo* [11]

El cobalto 60 (^{60}Co) es un isótopo artificial del cobalto, tiene una vida media de 5,27 años, se produce por activación de neutrones del isótopo ^{59}Co . El ^{60}Co decae por la

desintegración beta de los isótopos estables de níquel-60. El núcleo de níquel activado emite dos rayos gamma con energías de 1,17 y 1,33 MeV [12]. Tiene varios usos; sin embargo, su principal aplicación es exclusivamente a teleterapia. La actividad de una fuente nueva puede tener hasta 540 TBq. Debido a esto se puede categorizar en extremadamente peligrosa (categoría 1) [2], [13], [14].

Por su alta energía y actividad típicamente alta, las fuentes son potencialmente peligrosas. Incluso una exposición breve a este tipo de fuentes puede causar una dosis letal de radiación.

Solo pueden manipular las fuentes operadores especializados y capacitados, que tengan experiencia con la fuente y el dispositivo en que está montada. Se requiere equipo blindado especializado.

Las fuentes están doblemente encapsuladas en acero inoxidable, y contienen pastillas de cobalto que han sido tratadas en un reactor nuclear para producir el radioisótopo ^{60}Co . Se fabrican en dos o tres tamaños normalizados y pueden montarse en espaciadores de tungsteno dentro del cabezal de teleterapia [2], [13], [14].

Estas fuentes fueron empleadas para la terapia del cáncer mediante la proyección de un haz de radiación de alta energía centrado en el tumor. La fuente radiactiva se encuentra asegurada en la caja fuertemente blindada situada al final del brazo giratorio. El haz de radiación de la fuente queda al descubierto cuando se abre la ventana durante el uso. La caja blindada puede desmontarse del brazo giratorio y transportarse a un lugar especializado para la sustitución de la fuente agotada, o la transferencia de la fuente. Esta operación puede efectuarse en el lugar, utilizando un contenedor de transporte especial para entregar e instalar la nueva fuente y extraer la fuente agotada en una sola operación [2].

Hace algunos años, muchas instalaciones autorizadas para la práctica de teleterapia cesaron actividades por una modernización o cambio de tecnología, y se dejaron las fuentes en los equipos. Estas fuentes se deben reexportar o, si esto no es posible, se deben almacenar bajo control institucional. El almacenamiento debe efectuarse en instalaciones autorizadas para la gestión de fuentes en desuso. En Colombia se realiza en las instalaciones del ente regulador, previa coordinación entre las partes, y una vez se garantice el adecuado transporte del material radiactivo [5], [15].

Aunque las cifras exactas de las fuentes en desuso que en Colombia requieren esa disposición no son de conocimiento público, una de las estrategias del ente regulador es la consolidación de desechos radiactivos generados en el país, específicamente los desechos radiactivos de alta peligrosidad [16].

Debido al tiempo que ha transcurrido desde su ingreso al país y la fecha de su posible disposición final, las fuentes deben ser movidas bajo algunas condiciones poco convencionales en el transporte de material radiactivo. La mayoría de las fuentes que no pueden retornar a su lugar de origen o proveedor son trasladadas en bultos en virtud de un arreglo especial, es decir, bajo las siguientes condiciones:

- » Nivel total de seguridad resultante, control operacional adicional que se asemeja a las disposiciones establecidas para el transporte de material radiactivo. Los bultos, en virtud de arreglo especial, deben ser aprobados por todas las autoridades competentes del caso [3].
- » Este tipo de bulto da flexibilidad a los remitentes para proponer medidas de seguridad alternativas, que sean efectivamente equivalentes a las estipuladas en el Reglamento de Transporte [3].

Teniendo en cuenta que se trata de fuentes *extremadamente peligrosas*, y por lo descrito anteriormente, resulta fundamental una adecuada evaluación de seguridad y verificar de manera particular la robustez de la seguridad, probabilidad de fallo de las defensas, gravedad de las consecuencias y aceptabilidad del riesgo, con el fin de garantizar un transporte terrestre seguro.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el transporte existe una serie de defensas que consisten en barreras de seguridad (enclavamientos, alarmas o procedimientos) que pueden detectar problemas e impedir la ocurrencia de un suceso iniciador y el accidente asociado. Sin embargo, hay una determinada probabilidad (P) de que esas barreras puedan fallar, en cuyo caso ocurriría el accidente, que se manifestaría en unas consecuencias determinadas (C). La magnitud que caracteriza finalmente la secuencia accidental es el riesgo (R), que es la función de las tres variables independientes (la frecuencia del suceso iniciador,

la probabilidad de fallo de las barreras y la gravedad de las consecuencias) [10].

El método consiste en subdividir las variables independientes de la ecuación del riesgo en cuatro niveles cualitativos (alto, medio, bajo, muy bajo). Con la realización de todas las combinaciones lógicas posibles se obtendrán cuatro niveles de riesgo (muy alto, alto, medio y bajo). Para aplicar el método es necesario establecer los criterios de asignación de los niveles de cada una de las variables de frecuencia del suceso iniciador, probabilidad de fallo, consecuencia y riesgo [11].

2.1. Criterio para elaborar el listado de sucesos iniciadores

Para el desarrollo del proceso se ha implementado el método *análisis del modo y efecto de fallas* (AMEF) [17], procedimiento que permite identificar las fallas en los procesos, así como evaluar y clasificar de manera objetiva sus efectos, causas y elementos de identificación, para de esta forma evitar la ocurrencia de fallas y tener un proceso documentado de prevención.

Se logró identificar dos tipos de peligros, o sucesos:

- » Sucesos que desencadenan o inician un accidente. Deben ser interceptados por las defensas preventivas para prevenir consecuencias indeseadas.
- » Sucesos que hacen fallar alguna de las medidas de seguridad existentes: degradan la calidad de dichas medidas, que se interponen a la evolución del suceso iniciador hacia un accidente [17].

En el análisis de riesgo conviene separar los sucesos iniciadores de los fallos de las defensas, para que la evaluación pueda centrarse en el análisis de las secuencias accidentales desencadenadas por sucesos iniciadores. Por otra parte, a menudo el volumen de detalle que se obtiene de la aplicación de la técnica de identificación de peligros es muy grande, y los sucesos iniciadores se agrupan para reducirlos a un número que resulte manejable, sin que se pierda ninguna información significativa.

2.2. Identificación de los sucesos iniciadores

El proceso comienza con la identificación de todos los modos de falla posibles, para obtener un árbol de fallas y eventos hasta llegar a las secuencias accidentales. Este análisis se

basa en la experiencia, la revisión y, aunque no se conocen datos específicos para el transporte de bultos en arreglo especial, se tomaron como referencia los datos suministrados en la operación de transporte de material radiactivo de bultos tipo A de una empresa privada que opera en Colombia y que realiza más de tres mil transportes al año [18]. Colombia no cuenta con bases de datos de acceso público para el reporte de incidentes, accidentes y gestión de fuentes en desuso.

A continuación, se enuncian algunos tipos de fallos detectados:

Por error humano

Deterioro del bulto:

- » Por mal manejo del bulto durante el cargue y descargue.
- » Por mal almacenamiento del bulto.

Deshabilitación de alguna barrera o defensa

- » No cerrar adecuadamente el vehículo, falla en la postura del precinto y candado.
- » No revisar o cambiar el dosímetro de lectura directa.
- » No activar la alarma del vehículo durante los posibles almacenamientos en tránsito.
- » No activar o desactivar el sistema de GPS del vehículo o la fuente.
- » Error en la señalización o delimitación del vehículo.

Incidente durante el transporte

- » Choque del vehículo.
- » Volcamiento del vehículo.

Por fallo de equipos

- » Falla mecánica del vehículo.
- » Falla eléctrica del vehículo.

Por eventos externos

- » Incendio.
- » Desastre natural.
- » Robo.

2.2.1. Criterios para la asignación de frecuencia

Para la asignación de frecuencia se tomaron como referencia las sugeridas en la aplicación del método de matriz de riesgo en radiografía industrial [10].

En el estudio de riesgos se asume que los sucesos iniciadores ocurren de forma aleatoria con una frecuencia poco constante. No se cuenta con antecedentes que muestren la ocurrencia de estos; por lo tanto, se realiza una valoración basándose en la factibilidad de los eventos [10].

Los niveles de frecuencia de los sucesos iniciadores se han clasificado desde muy bajos hasta muy altos del siguiente modo:

Frecuencia alta (f_A): el suceso ocurre frecuentemente (en un 10% de las operaciones).

Frecuencia media (f_M): el suceso ocurre ocasionalmente (en un 5% de las operaciones).

Frecuencia baja (f_B): es poco usual o raro que ocurra el suceso iniciador, aunque se presupone que ha ocurrido (en un 1% de las operaciones).

Frecuencia muy baja (f_{MB}): es muy raro que ocurra el suceso iniciador. No se tiene conocimiento de que haya ocurrido, pero se considera remotamente posible (en un 0,1% de las operaciones).

Para facilitar la asignación de niveles y reducir la subjetividad se utilizaron los criterios semicuantitativos, como probabilidad de ocurrencia por número de operaciones, partiendo del alcance esperado de quince operaciones anuales, aproximadamente [19].

Tabla 1. Criterios de asignación de los niveles de frecuencia

Frecuencia cualitativa		Probabilidad de ocurrencia (%)	Número de sucesos por año
Alta	f_A	10	Más de 2 por año, $F \geq 2$
Media	f_M	5	Entre 1 y 2 por año, $2 \leq F < 1$
Baja	f_B	1	Entre 1 por año y 1 en 10 años, $1 \leq F < 0,1$
Muy baja	f_{MB}	0,1	Menos de 1 en 10 años, $F < 0,1$

Fuente: autor

2.2.2. Criterios para asignar los niveles de consecuencias

Para asignar los niveles de consecuencias (C) se parte de que ya ha ocurrido el suceso iniciador y han fallado todas las barreras. Los sucesos iniciadores identificados pueden tener consecuencias en trabajadores y público. A continuación se muestran los criterios para asignar los niveles de las consecuencias.

Muy altas (C_{MA}). Consideradas como catastróficas o muy graves, ocasionan muertes o daños limitantes en el trabajador. Se asume que la magnitud de error de dosis es superior al 25% respecto a las dosis permitidas (exposiciones potenciales).

Altas o graves (C_A). Ocasionan la muerte o daños limitantes en el trabajador. De igual forma, se incluyen en este nivel las exposiciones que pueden afectar a otros trabajadores, cuyos errores de dosis están entre 10 y 25% respecto a las dosis permitidas.

Medias (C_M). Clínicamente no ponen en riesgo la vida del trabajador. Son exposiciones que lo afectan en el desarrollo de alguna práctica que involucre las fuentes.

Bajas (C_B). Disminución de la defensa en profundidad. Dicha consecuencia no presenta ninguna desviación en las dosis.

Los niveles de consecuencia fueron asignados teniendo en cuenta las dosis potenciales y normales.

2.2.3. Criterios para la asignación de niveles de probabilidad de fallo al conjunto de barreras

La probabilidad de fallo del conjunto de barreras está dada por el producto de la probabilidad de fallo de cada una de las barreras existentes ($P = P_1 \cap P_2 \cap P_3 \dots \cap P_n$), suponiendo que las barreras sean independientes y tengan igual probabilidad de fallo. Puesto que cada uno de los p_i es menor que la unidad, el producto, es decir, la probabilidad total, es tanto menor cuanto mayor sea el número de barreras. Por lo tanto, se pueden establecer los niveles decrecientes de P en función del número creciente de barreras directas, tal y como se muestran a continuación [11]:

- » *Alta* (P_A): no hay ninguna barrera de seguridad
- » *Media* (P_M): hay una o dos barreras de seguridad
- » *Baja* (P_B): hay tres barreras de seguridad
- » *Muy Baja* (P_{MB}): hay cuatro o más barreras de seguridad

2.2.4. Asignación de niveles de riesgo

Las secuencias para las cuales el nivel de riesgo resultante sea alto o muy alto serán analizadas en mayor profundidad, con el fin de adelantar el proceso de optimización y disminuir el riesgo hasta un nivel aceptable (riesgo medio o bajo).

En los estudios de riesgos se asume que los sucesos iniciadores ocurren de forma aleatoria en el tiempo, con una frecuencia constante (modelo Poisson). Los registros que incluyan la ocurrencia de estos accidentes pueden ser la aproximación más objetiva a su frecuencia [11].

f_A	P_A	C_{MA}	R_{MA}	f_A	P_A	C_A	R_{MA}	f_A	P_A	C_M	R_A	f_A	P_A	C_B	R_M
f_M	P_A	C_{MA}	R_{MA}	f_M	P_A	C_A	R_A	f_M	P_A	C_M	R_A	f_M	P_A	C_B	R_M
f_B	P_A	C_{MA}	R_A	f_B	P_A	C_A	R_A	f_B	P_A	C_M	R_M	f_B	P_A	C_B	R_M
f_{MB}	P_A	C_{MA}	R_A	f_{MB}	P_A	C_A	R_A	f_{MB}	P_A	C_M	R_M	f_{MB}	P_A	C_B	R_M
f_A	P_M	C_{MA}	R_{MA}	f_A	P_M	C_A	R_A	f_A	P_M	C_M	R_A	f_A	P_M	C_B	R_M
f_M	P_M	C_{MA}	R_A	f_M	P_M	C_A	R_A	f_M	P_M	C_M	R_M	f_M	P_M	C_B	R_M
f_B	P_M	C_{MA}	R_A	f_B	P_M	C_A	R_A	f_B	P_M	C_M	R_M	f_B	P_M	C_B	R_B
f_{MB}	P_M	C_{MA}	R_A	f_{MB}	P_M	C_A	R_M	f_{MB}	P_M	C_M	R_M	f_{MB}	P_M	C_B	R_B
f_A	P_B	C_{MA}	R_A	f_A	P_B	C_A	R_A	f_A	P_B	C_M	R_M	f_A	P_B	C_B	R_B
f_M	P_B	C_{MA}	R_A	f_M	P_B	C_A	R_A	f_M	P_B	C_M	R_M	f_M	P_B	C_B	R_B
f_B	P_B	C_{MA}	R_M	f_B	P_B	C_A	R_M	f_B	P_B	C_M	R_B	f_B	P_B	C_B	R_B
f_{MB}	P_B	C_{MA}	R_M	f_{MB}	P_B	C_A	R_M	f_{MB}	P_B	C_M	R_B	f_{MB}	P_B	C_B	R_B
f_A	P_{MB}	C_{MA}	R_A	f_A	P_{MB}	C_A	R_M	f_A	P_{MB}	C_M	R_M	f_A	P_{MB}	C_B	R_B
f_M	P_{MB}	C_{MA}	R_M	f_M	P_{MB}	C_A	R_M	f_M	P_{MB}	C_M	R_M	f_M	P_{MB}	C_B	R_B
f_B	P_{MB}	C_{MA}	R_M	f_B	P_{MB}	C_A	R_B	f_B	P_{MB}	C_M	R_B	f_B	P_{MB}	C_B	R_B
f_{MB}	P_{MB}	C_{MA}	R_M	f_{MB}	P_{MB}	C_A	R_B	f_{MB}	P_{MB}	C_M	R_B	f_{MB}	P_{MB}	C_B	R_B

Figura 1. Matriz de riesgo.

Fuente: [10]

Teniendo en cuenta ese enfoque conservador, y de requerirse, se realiza el segundo filtrado, o *segundo cribado*, que tiene dos objetivos básicos: 1) hacer una evaluación más profunda de las secuencias evaluadas con riesgos inaceptables, y 2) proponer medidas para reducir el riesgo en cada caso.

Es preciso puntualizar que esta metodología facilita la clasificación de las secuencias accidentales en niveles de riesgo, pero no proporciona valores de riesgo. Esto significa que el hecho de que dos secuencias accidentales converjan en un mismo intervalo de riesgo no quiere decir que sean de igual riesgo [20].

2.2.5. Aceptabilidad del riesgo

La primera prioridad se asigna a la adopción de medidas adicionales para aquellas secuencias accidentales cuyo riesgo resulta ser *muy alto* y *alto*. La segunda prioridad la tiene el análisis de los sucesos cuyo nivel de riesgo sea *medio*, en especial los de consecuencias *altas* y *muy altas*, lo cual representa una mejora continua, parte de un proceso de optimización, y conduce la seguridad a un grado mayor que el estrictamente imprescindible.

Tabla 2. Criterios de aceptabilidad del riesgo [11]

Intervalo de riesgo	Tolerabilidad del riesgo	Acciones
R_{MA}	Inaceptable	Es preciso paralizar la práctica y tomar las medidas necesarias para reducir el riesgo antes del reinicio de los trabajos
R_A	Inaceptable si las consecuencias son altas o muy altas	Se requiere adoptar medidas inmediatas para reducir el riesgo, o tendrá que paralizarse la práctica
	Inaceptable, tolerable temporalmente bajo determinadas condiciones si las consecuencias son medias	Se requieren medidas para reducir el riesgo en un plazo apropiado de tiempo
R_M	Tolerable según análisis costo/beneficio	Deben introducirse mejoras o medidas que reduzcan el riesgo al nivel más bajo posible, considerando criterios de costo/beneficio
R_B	Despreciable	No se requerirán acciones o medidas adicionales de seguridad

Fuente: autor

2.2.6. Criterios para evaluar la robustez del conjunto de barreras

En la tabla 3 se muestra el procedimiento, que incluye factores que permiten evaluar la robustez del conjunto de

barreras. Estos criterios de robustez de las barreras permiten determinar si el conjunto de barreras es suficientemente robusto.

Tabla 3. Criterios para evaluar la robustez del conjunto de barreras [10]

N.º	Tipo de barrera	Robustez expresada en puntos
1	Barreras tipo 1: enclavamiento o bloqueos	32
2	Barreras tipo 2: alarmas	16
3	Barrera tipo 3: procedimiento ejecutado por los trabajadores ocupacionalmente expuestos	8
4	Barrera tipo 4: procedimientos ejecutados por trabajadores y público en general	4

Fuente: autor

2.2.7. Reductores de frecuencia

La importancia de los reductores de frecuencia es muy significativa cuando la frecuencia asignada a los sucesos iniciadores es de $f_A, f_M, o f_B$, ya que la existencia de al menos tres de estos reductores podría sugerir la probabilidad de clasificar la frecuencia en un nivel inferior al inicialmente asignado según la metodología. En caso de que la frecuencia asignada

fuera f_{MB} , no sería eficaz utilizar reductores de frecuencia, ya que este es el menor nivel de frecuencia contemplado en la metodología [20].

2.2.8. Reductores de consecuencias

La importancia de los reductores de consecuencias es muy significativa cuando la consecuencia de los sucesos inicia-

dores es C_A o C_{MA} . Sin embargo, en estos casos la robustez no puede medirse únicamente por el número de reductores existentes, ya que puede ocurrir que estos actúen cuando ya las consecuencias postuladas se han manifestado.

Por lo tanto, más importante que el número de reductores de consecuencias es la eficacia de un determinado reductor al actuar en una secuencia accidental concreta [10].

2.2.9. Secuencia accidental

El objetivo es desarrollar un modelo que relacione la ocurrencia de un evento iniciante, la respuesta de la instalación para este evento y el espectro de resultados y estados posibles. Es decir que el modelado de secuencias accidentales se obtiene teniendo en cuenta la evolución de los sistemas de seguridad de la instalación ante la ocurrencia de un evento iniciante [21].

El análisis de las secuencias accidentales puede realizarse utilizando métodos tabulares o gráficos:

- » Los métodos tabulares analizan el escenario que se produce cuando han fallado todas las barreras de seguridad asociadas a un suceso iniciador.
- » Las secuencias accidentales también pueden ser descritas gráficamente utilizando árboles de sucesos, árboles de fallo o diagramas de barreras (*bow tie*) [22].

Uno de los métodos más conocidos para modelar las secuencias accidentales es el análisis por medio de un *árbol de eventos*. Este es un modelo gráfico inductivo que permite representar la respuesta de la instalación ante un evento iniciante, y por lo tanto, delinear las secuencias de accidentes, dado el éxito o el fracaso de los sistemas de seguridad requeridos y de los operadores que llevan a cabo funciones de seguridad [21].

Para el desarrollo de las secuencias accidentales se usó un árbol de eventos y fallos. Debido a la cantidad de información, solo se indicará una secuencia a manera de ejemplo.

3. RESULTADOS

El cribado se efectuó en dos fases, como lo sugiere el método. En la primera se tuvo en cuenta la cantidad de medidas de seguridad, se clasificaron los sucesos y se asignó un riesgo provisional; en la segunda fase se verificó la calidad y robustez, con el fin reducir el nivel de riesgo o determinar si se requerían medidas provisionales.

3.1. Primer cribado

El método de matriz de riesgo se aplicó para obtener una evaluación de seguridad en el transporte de fuentes de cobalto-60 (^{60}Co) categoría 1, en bultos, en virtud de arreglo especial.

Teniendo en cuenta la escasa información sobre el transporte de material radiactivo de las características descritas, y de manera particular sobre los bultos, en virtud de un arreglo especial, se identificó una serie de sucesos iniciadores hipotéticos basándose en la experiencia en transporte terrestre y teniendo en cuenta los factores externos en Colombia [18]. De esta manera se plantearon nueve sucesos iniciadores, entre los que se incluyen alteraciones de orden público.

La tabla 4 presenta los posibles sucesos iniciadores, el nivel de consecuencia asignado obtenido a partir de los criterios descritos y el efecto sobre los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE), definidos como personas y miembros del público (PUB), este último definido como cualquier individuo de la población [15].

Las consecuencias descritas solo se darán de presentarse la secuencia accidental, en la que fallan todas las barreras y se ve vulnerada en profundidad la defensa de las instalaciones. En otras palabras, estas consecuencias solo se presentarán si no se detectan los fallos.

Se describieron veintiuna barreras de seguridad para el transporte, agrupadas en los siguientes tipos: dos enclavamientos, diez alarmas, y nueve barreras asociadas a los procedimientos. Algunas de ellas son: dispositivos para seguimiento satelital de la fuente y el vehículo, escolta especializada en carga crítica, cintas de amarre certificadas, alarmas que se activen durante el desplazamiento, autorización para el arreglo especial por el ente regulador, procedimientos y documentos.

Se plantearon nueve reductores de frecuencia para el transporte, que incluyeron las alarmas de los monitores usados en la operación, mantenimientos preventivos de vehículos y detectores de radiación, límites de velocidad, sistemas de amarre para el anclaje del bulto certificados y capacitaciones.

Se establecieron seis reductores de consecuencia, que incluyen el apagado remoto del vehículo ante una emergencia, las tarjetas de emergencia del ^{60}Co , criterios de aceptación del bulto, prueba de fugas y procedimiento para atención de emergencias.

En caso de que ocurran los sucesos y se desencadene un accidente, se estiman consecuencias altas. La figura 2 muestra la secuencia accidental de uno de los sucesos iniciadores.

Tabla 4. Sucesos iniciadores de incidentes y el nivel de consecuencia asignado

S.I.	Descripción	Sobre	C
SI. 1	Deficiencia del blindaje del bulto en arreglo especial	TOE/PUB	A
SI. 2	Incorrecto anclaje del bulto en el vehículo	TOE	A
SI. 3	Cargue inadecuado de la fuente	TOE	A
SI. 4	Salida de la carretera, choque, volcamiento o incendio del vehículo.	TOE	A
SI. 5	Deterioro del bulto, fugas de material	TOE	A
SI. 6	Pérdida o robo de una fuente durante el transporte	PUB	A
SI. 7	Pérdida o robo de una fuente durante el almacenamiento en tránsito	PUB	A
SI. 8	Ataque de grupos al margen de la ley	PUB	A
SI. 9	Desastre natural como inundación, sismo o terremoto	TOE/PUB	A

Fuente: autor

Sucedor iniciador	Barreras			
Si: ataque de grupos al margen de la ley	Plan de transporte y acompañamiento (OPR)	Acompañamiento de escolta compañía y escolta para carga crítica	Sistema de GPS para el vehículo y para el bulto. Uso del botón de pánico	Uso de cadena y candado en el contenedor y candados para el vehículo

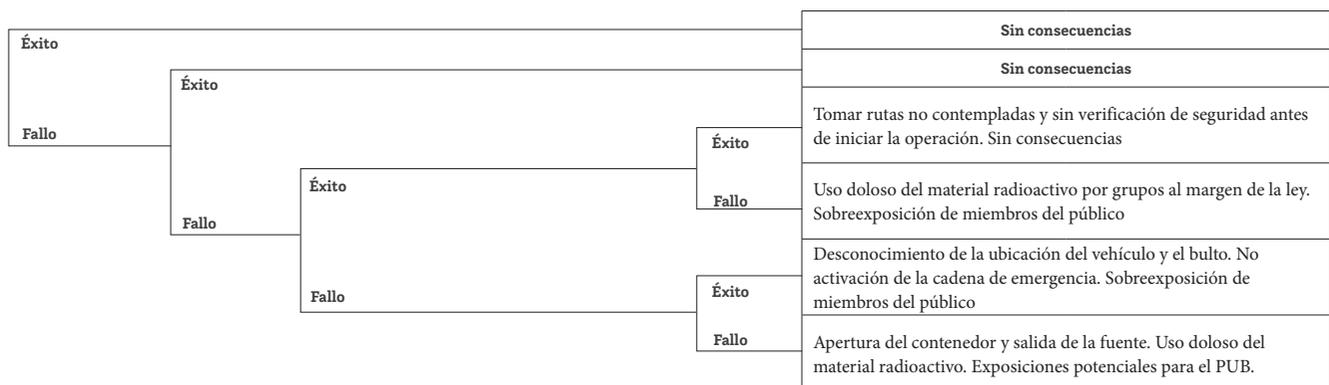


Figura 2. Secuencia accidental suceso 8. Ataque de grupos al margen de la ley.

Una vez aplicado el método en la primera fase, se obtuvo la matriz de riesgo como se muestra

Tabla 5. Matriz de riesgo. Muestra los nueve sistemas iniciadores, los efectos que tiene sobre el público, además de su frecuencia, probabilidad, consecuencia y riesgo final

S.I.	f	P	C	R
SI. 1	B	MB	A	B
SI. 2	B	MB	A	B
SI. 3	B	B	A	M
SI. 4	B	B	A	M
SI. 5	B	MB	A	B
SI. 6	B	B	A	M
SI. 7	B	B	A	M
SI. 8	B	B	MA	M
SI. 9	B	B	A	M

Fuente: autor

3.1.1. Frecuencia

A la fecha no se relacionan frecuencias de accidentes o incidentes asociados al transporte de ⁶⁰Co categoría 1 en arreglo especial; sin embargo, se estima que podría presentarse algún evento.

El número de eventos por año permitió estimar la frecuencia de ocurrencia. Debido a que no hay un registro de la ocurrencia de eventos que puedan desencadenar un suceso iniciador, se presupone que ha ocurrido en un 1% de las operaciones; no se asignaron frecuencias muy bajas para ser más conservadores.

3.1.2. Consecuencias

El análisis detallado de las posibles consecuencias producto de cada suceso iniciador discriminado en consecuencias para los trabajadores y público puso en evidencia que el

riesgo previsto, dada la peligrosidad de la fuente, desencadenaría consecuencias altas. De esas posibles consecuencias, el 56% podría afectar a trabajadores ocupacionalmente expuestos, y el 44% restante a miembros del público, como lo indica la figura 3.

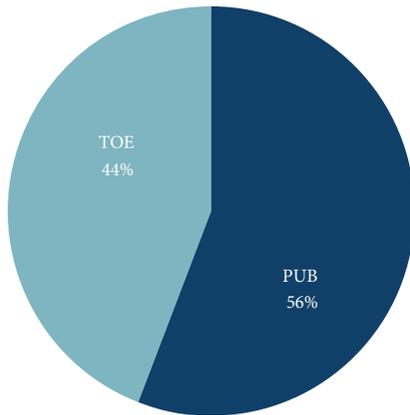


Figura 3. Consecuencia sobre TOE y PUB.

Fuente: autor

La ocurrencia de sucesos iniciadores relacionados con los tipos de fallas (fallo de equipo, error humano, evento externo) podría ocasionar consecuencias altas, con un posible incremento en las dosis recibidas por los miembros del público y trabajadores ocupacionalmente expuestos. Este resultado confirma la importancia de las estrictas medidas de protección y seguridad radiológica para el transporte seguro de ⁶⁰Co categoría 1, en virtud de arreglo especial.

3.1.3. Barreras y reductores de frecuencia y secuencia

El conjunto de barreras por suceso iniciador es muy significativo y robustece la seguridad de la operación. Se puede concluir que la adecuada planeación de la operación (barre-

ra, plan de transporte) y el acompañamiento por personal cualificado (acompañamiento OPR, escolta, etc.) es fundamental. Las barreras físicas también son importantes.

En cuanto a los reductores de consecuencias, se encontró que uno de los más importantes, debido a su participación en los sucesos iniciadores (cuatro de nueve), fue el procedimiento de emergencia e incidente, con 89%, y el uso de la tarjeta de seguridad. En cuanto a los reductores de frecuencia, se identificó una amplia participación del límite de velocidad, revisión del estado de las vías y estado del orden público en los lugares por donde se iba a transitar y capacitación del personal.

3.1.4. Riesgo

En la tabla 5 no se presentan situaciones en que el nivel de riesgo sea *muy alto* (MA) ni *alto* (A), debido a la robustez de las barreras de seguridad, la probabilidad de fallo conjunto, los reductores de frecuencia y consecuencias contemplados para la operación. Un 67% del total de los sucesos iniciadores presentó un riesgo *medio*, en su mayoría relacionado con problemas de orden público, es decir, asociados a sucesos externos a la operación; un 33% presentó nivel de riesgo *bajo*, asociado a procedimientos realizados por el remitente y el transportador, y a la aplicación de criterios de aceptación del bulto para el transporte.

3.1.5. Aceptabilidad del riesgo

Según la tabla 5, que indica el nivel de riesgo asignado a cada una de los sucesos iniciadores establecidos, y con el fin de determinar si se requieren medidas adicionales, se consideró la aceptabilidad del riesgo que se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Aceptabilidad del riesgo

S.I.	Riesgo	Tolerancia de riesgo	Acciones correctoras
SI. 3, SI. 4, SI. 6, SI. 7, SI. 8, SI. 9	M	Tolerable	Deben introducirse las mejoras o medidas que reduzcan el riesgo al nivel más bajo posible
SI. 1, SI. 2, SI. 5	B	Despreciable	No se requieren acciones o medidas adicionales de seguridad

Fuente: autor

En el método de matriz de riesgo se les da especial prioridad a los sucesos iniciadores que presentan riesgo alto y riesgo medio, con el fin de llevar al máximo la seguridad en

la práctica. Para reducir el riesgo, la metodología sugiere la aplicación de un segundo cribado.

3.2. Segundo cribado

Con el fin de reducir el riesgo, y teniendo presente la robustez del conjunto de barreras, reductores de frecuencia y consecuencia, se efectuó un segundo cribado.

Se revisaron los criterios sugeridos para la aplicación del método planteados en el documento “Aplicación del método de matriz de riesgo en radiológica industrial”, se verificó la robustez de la barreras de seguridad, de los reductores de frecuencia y consecuencia, lo que permitió reducir el riesgo a partir de la probabilidad, teniendo en cuenta lo siguiente:

“Se considera robusto el conjunto de barreras si $P_1 \cap P_2 \cap P_3 > 64$ puntos. Ello permite reducir la probabilidad desde P_B hasta P_{MB} ” [10].

La tabla 7 muestra el número de barreras que interviene en cada suceso iniciador, la probabilidad de fallo conjunto de las barreras y riesgo en el primer y segundo cribado.

Tabla 7. Recategorización de la probabilidad de fallo conjunto de las barreras y su impacto en el riesgo

S.I.	Número de barreras	Primer cribado		Segundo cribado	
		P	R	P	R
SI. 1	7	MB	B	MB	B
SI. 2	5	MB	B	MB	B
SI. 3	5	B	M	MB	B
SI. 4	4	B	M	MB	B
SI. 5	8	MB	B	MB	B
SI. 6	9	B	M	MB	B
SI. 7	9	B	M	MB	B
SI. 8	10	B	M	MB	M
SI. 9	4	B	M	MB	B

Fuente: autor

Después de la recategorización de la probabilidad de fallo conjunto de las barreras se logró una reclasificación del riesgo en cinco de los sucesos que presentaban R_M a R_B , gracias a la robustez de las barreras.

La tabla 7 muestra una reducción de los niveles de riesgo de todos los sucesos que estaban en *medio*; sin embargo, por probabilidad de fallo no fue posible reducir el riesgo del suceso iniciador 8, “Ataque de grupo al margen de la ley”. La metodología sugiere reducir el nivel de consecuencia o frecuencia a partir de la robustez de los reductores de frecuencia y consecuencia. El suceso iniciador 8 tiene un reductor de frecuencia y cinco reductores de consecuencia, así que usamos los criterios para reducir las consecuencias.

La aplicación de estos factores de robustez de los reductores de consecuencia permite establecer criterios para discernir si el conjunto de estos reductores es suficientemente robusto [19].

Estos criterios pueden ser los siguientes:

Si la multiplicación de la robustez de los reductores de consecuencia es mayor que 64 puntos ($R_1 * R_2 * R_3 \dots R_n > 64$), es posible reducir un nivel de consecuencia, por ejemplo, de C_{MA} pasa a C_A [19].

El suceso tiene relacionados dos reductores de consecuencia tipo alarma (botón de pánico y apagado remoto del vehículo) y tres elementos relacionados con el plan de emergencias (hojas de seguridad, respuesta de emergencia y cadena de llamada), lo que suma un puntaje mayor de 64. Esto permitió reducir el nivel de consecuencia de *muy alto* a *alto*. A pesar de que la matriz es conservadora, la reducción de la consecuencia del suceso 8 ayudó a reducir el nivel de riesgo de *medio* a *bajo*.

3.2.1. Aceptabilidad del riesgo

Gracias a la robustez de las barreras y los reductores de consecuencia fue posible reducir el riesgo de los sucesos que se encontraban en riesgo medio a riesgo bajo, lo que indica que no se requieren acciones o medidas adicionales de seguridad, ya que su tolerancia de riesgo es *despreciable*.

4. CONCLUSIONES

La metodología de la matriz de riesgo se pudo aplicar de manera satisfactoria al transporte de bultos en arreglo especial, permitió un reconocimiento detenido de las barreras de seguridad y reductores de frecuencia y consecuencia necesario para la operación.

El uso de la matriz de riesgo resulta de gran utilidad para la evaluación previa a la operación de transporte, pues ayuda a identificar posibles modos de fallo a partir de sucesos iniciadores, y sobre esta base, facilita la proyección de medidas de seguridad necesarias para evitar su ocurrencia o minimizar sus consecuencias. Es por esto que puede ser una excelente herramienta para elaborar evaluaciones de seguridad para el transporte terrestre de material radiactivo.

Colombia es un país con graves problemas de seguridad y con dificultades de orden público. La aplicación del método de matriz de riesgo nos permitió evidenciar las fortale-

zas, las barreras y los reductores para el riesgo ante posibles eventos externos.

La sistematización de la aplicación del método de matriz de riesgo a partir de sucesos conocidos facilitaría el análisis para obtener evaluaciones de seguridad en el transporte terrestre de material radiactivo.

Recomendaciones

Documentar los casos de transporte de material radiactivo realizados bajo los parámetros planteados en la evaluación de seguridad y evaluar la eficacia del método de matriz de riesgo aplicado en la práctica.

Referencias

- [1] Organismo Internacional de Energía Atómica, "Transport of Radioactive Materials: The Need for Radiation Protection Programmes", *Packaging, Transport, Storage and Security of Radioactive Material*, vol. 15, n.º 1, 2004, pp. 65-69.
- [2] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Identificación de fuentes y dispositivos*. Colección de Normas de Seguridad del OIEA, n.º 5, Viena: OIEA, 2009.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Regulations for the safe Transport of Radioactive Material*, Viena, 2018.
- [4] W. R. Johnston, "Database of Radiological Incidents and Related Events", en. 2014. [En línea]. Disponible en <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html> [Consultado en. 2014].
- [5] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Seguridad de los generadores de radiación y de las fuentes radiactivas selladas*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, n.º RSG-1.10, Viena: OIEA, 2009.
- [6] Centro Nacional de Seguridad Nuclear, "Guía de evaluación de seguridad de prácticas y actividades asociadas al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes", Resolución n.º 17/2012-CITMA, La Habana, 2012.
- [7] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 90874 de 2014, "Requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones", Bogotá, 2014.
- [8] E. C. Calderon, "Análisis de seguridad radiológica de una instalación PET/CT mediante el empleo de la matriz de riesgo", *Nucleus*, n.º 62, 2017, pp. 38-42.
- [9] A. Alles, Y. Pérez y C. Duménigo, "Evaluación de la seguridad radiológica en el perfilaje de pozos", en *X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*, Buenos Aires, 2015.
- [10] Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (2016). *Aplicación del método de matriz de riesgo en radiología industrial*. [En línea]. Disponible en <http://www.foroiberam.org/documents/193375/84925c64-e67e-42e3-b650-d46a19e77c9f>
- [11] International Atomic Energy Agency, *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia*, Tecdoc-1685/S, Viena, 2012.
- [12] E. S. Agency, "Basic Information About the Estec Co-60 Facility", 2010. [En línea]. Disponible en <https://escies.org/webdocument/showArticle?id=251>. [Consultado nov. 2018].
- [13] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Cantidades peligrosas de material radiactivo (valores D), EPR-D-Values*, Viena: OIEA, 2006.
- [14] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 18-0052, "Sistema de categorización de las fuentes radiactivas", Bogotá, 2008.
- [15] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad. Requisitos de seguridad generales*, parte 3, Viena: OIEA, 2016.
- [16] Servicio Geológico Colombiano, "Plan estratégico institucional, PEI 2015-2018. Política 1. Gestión misional y de gobierno", Bogotá, 2015.
- [17] Organismo Internacional de Energía Atómica, "Análisis probabilista de seguridad de tratamientos de radioterapia con acelerador lineal", documento técnico, 2012.
- [18] Importrans Radiactivos Ltda., página web. [En línea]. Disponible en <http://importransradiactivos.com/index.html>, 2018. [Consultado ago. 2018].
- [19] Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (2016). *Aplicación del método de matriz en radiografía industrial*. [En línea]. Disponible en <http://www.foroiberam.org/documents/193375/84925c64-e67e-42e3-b650-d46a19e77c9f>
- [20] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia*, IAEA- Tecdoc-1685/S, Viena, 2012.

- [21] F. Alderete y C. Elechosa, “Análisis probabilístico de seguridad en plantas industriales de irradiación”, en *Primer Congreso Americano del IRPA (International Radiation Protection Association)*, Acapulco, 2006.
- [22] Centro Nacional de Seguridad Nuclear, *Guía de evaluación de seguridad de prácticas y actividades al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes*, La Habana, 2012.
- [23] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Manual explicativo para la aplicación del reglamento del OIEA para el transporte seguro de materiales radiactivos Guía de seguridad*, Viena: OIEA, 2010.
- [24] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA, n.º GSR Part 4), Viena: OIEA, 2010.
- [25] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación*, Colección Seguridad, n.º 115, Viena: OIEA, 1997.
- [26] D. Delacroix, J. P. Guerre, P. Leblanc *et al.*, “Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 98, n.º 1, 2002, Francia: Nuclear Technology Publishing, 2002.
- [27] Centro Nacional de Seguridad Nuclear, *Guía de evaluación de seguridad de prácticas y actividades al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes*, La Habana, 2012.