

# Aplicación de la metodología de matrices de riesgo en el análisis de seguridad de la práctica de radiotrazadores en la industria

 Niurka González Rodríguez,  Isis Ma. Fernández Gómez,  Eduardo A. Capote Ferrera,  
 Milagros Derivet Zarzábal  
Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR)  
niurka@cphr.edu.cu

## Resumen

El empleo de sustancias que permitan marcar o identificar una fase o parte de un sistema, o sea, que funjan como trazadores, constituye una herramienta eficaz en el estudio de múltiples fenómenos. Existen diferentes clases de trazadores y, dentro de ellos los radiactivos, son de los más sensibles y empleados para el estudio y diagnóstico en línea del funcionamiento de disímiles sistemas, de ahí que su empleo en procesos industriales esté muy extendido.

Por otra parte, en nuestro país para el empleo de cualquier fuente de radiaciones ionizantes es necesaria la autorización de la Autoridad Reguladora Nacional. Con este fin se realizó y presentó para su evaluación por dicha autoridad, el programa de protección radiológica de la práctica, que incluye el análisis de seguridad, los procedimientos operacionales y de seguridad, así como el plan de emergencias radiológicas.

El análisis de seguridad incluyó la estimación de las dosis esperadas en condiciones normales de operación y la evaluación de los riesgos radiológicos con la metodología de Matrices de Riesgo.

Como resultado, se obtuvo que las dosis en condiciones de operación normal cumplen con los límites anuales para trabajadores ocupacionalmente expuestos y para el público mientras que los niveles de riesgos son predominantemente bajos, por lo que se concluyó que es posible realizar la práctica en condiciones adecuadas de seguridad y el CPHR obtuvo la licencia de operación para la práctica.

---

*Palabras clave:* técnicas de trazadores; análisis de seguridad; valoración del riesgo; autorizaciones de explotación; protección contra las radiaciones; dosis de radiación; radiografía industrial; límites de dosis

---

## Application of the risk matrix methodology in the safety analysis of the practice of radiotracers in the industry

### Abstract

The use of substances to diagnose or identify a system specific phase, that is, which function as tracers, is an effective tool in the study of multiple phenomena. There are several kinds of tracers and, within them, radioactive tracers are the most sensitive and used for the study and online diagnosis of many systems, hence their use in industrial processes has an extensive use.

However, an authorization from the National Regulatory Body is necessary to use radioactive sources. The safety assessment, the radiation protection program, operational and safety procedures as well as the emergency plan were prepared and presented to the Regulatory Body to apply for authorization.

The safety assessment includes the dose estimations for normal operations and potential doses in accidental situations. The safety analysis used the methodology of risk matrixes. As a result, it was obtained that the doses under normal operating conditions comply with the annual limits for occupationally exposed workers and for the public, while the risk levels are predominantly low, so it was concluded that it is possible to carry out the practice under adequate security conditions and the CPHR obtained the operating license.

---

*Key words:* tracer techniques; safety analysis; risk assessment; operating licenses; radiation protection; radiation doses; industrial radiography; dose limits

---

## Introducción

El uso de sustancias que permitan marcar o identificar una fase específica o una parte de un sistema, o sea, que funjan como trazadores, constituye una herramienta eficaz en el estudio de múltiples fenómenos. Existen diferentes clases de trazadores y, dentro de ellos los radiactivos, son de los más sensibles y empleados para el estudio y diagnóstico en línea del funcionamiento de disímiles sistemas, de ahí que su empleo en diversos procesos industriales esté ampliamente extendido. El principio básico del uso de un trazador es "marcar" una sustancia, objeto o fase de un sistema o proceso y "seguirlo" a través del mismo, mediante la determinación cuantitativa y registro de los resultados; para evaluar aspectos específicos de su comportamiento de ahí que el trazador a emplear debe comportarse de la misma manera que el material marcado a la vez que debe poder distinguirse de dicho material de forma tal que sea fácilmente detectable entre otros componentes del medio a estudiar. [1-3]

Por parte, la sensibilidad de detección para los radiotrazadores es sumamente alta, lo que facilita su uso a gran escala, el comportamiento del material radiactivo es independiente de las condiciones agresivas de los procesos y es posible realizar la investigación en línea sin necesidad de tomar muestras, por lo que el empleo de trazadores radiactivos para el diagnóstico o determinación de parámetros de diferentes procesos industriales tiene un amplio uso. [1-4]

Esta fue la razón por la que, como parte de los servicios científico – tecnológicos que brinda el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), se decidió implementar un servicio de aplicación de trazadores radiactivos para la evaluación de Sistemas de Tratamiento de Residuales Líquidos (STRL) industriales y la medición de flujo en conductos cerrados por el método de tiempo de tránsito.

Por otra parte, en nuestro país, para el empleo de cualquier fuente de radiaciones ionizantes se requiere de una autorización de la Dirección de Seguridad Nuclear (DSN), Autoridad Reguladora en materia de protección radiológica y seguridad nuclear por lo que se hizo necesario obtener una Licencia de Operación para la práctica de trazadores radiactivos que amparara la prestación de dicho servicio [5]. Una vez evaluada la documentación presentada por parte de la DSN, le fue otorgada a la entidad la Licencia de Operación para la práctica y bajo su amparo se han realizado varios estudios de sistemas de tratamiento de residuales líquidos con trazadores radiactivos, de gran importancia para las instalaciones objeto de estudio.

El objetivo del trabajo es evaluar el estado de seguridad de la práctica de empleo de trazadores radiactivos en la industria mediante la estimación de las dosis en condiciones de operación normal y de los riesgos con la metodología de Matrices de Riesgo.

## Materiales y métodos

El análisis de seguridad de la práctica de trazadores radiactivos en la industria se realizó según lo establecido

en el Reglamento sobre Notificación y Autorización de prácticas y actividades asociadas al empleo de Fuentes de Radiaciones Ionizantes, vigente en el país desde el año 2011, e incluyó la estimación de las dosis esperadas en condiciones normales de operación y en situaciones de emergencias radiológicas. La identificación de los sucesos iniciadores de posibles situaciones accidentales se realizó mediante un Análisis "Qué – Si" y el criterio de expertos (oficial de protección radiológica de la entidad y especialistas vinculados a la práctica, con experiencia en estos procesos para diferentes instalaciones del país) mientras que la evaluación de riesgos de estas secuencias accidentales se realizó utilizando la Metodología de Matrices de Riesgo. [5]

## Resultados

El análisis de seguridad se realizó en primer lugar, para evaluar el nivel de seguridad de las operaciones y en segundo, como parte de la documentación de apoyo a la solicitud de la Licencia de Operación de la práctica de trazadores radiactivos en la industria.

Para este análisis se tuvo en cuenta que, debido a que se emplean fuentes radiactivas no selladas, los riesgos radiológicos son tanto de exposición externa como de contaminación ya sea externa o interna [6], e incluyó la estimación de las dosis en condiciones de operación normal y las dosis potenciales para sucesos previsibles para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y para el público. Se postularon una serie de posibles eventos relacionados con fallas de equipos, derrame de materiales radiactivos y errores humanos. Se identificaron las barreras de seguridad para prevenir o mitigar situaciones accidentales y se evaluaron sus consecuencias radiológicas [5, 7].

Las dosis para los trabajadores ocupacionalmente expuestos durante las operaciones normales se estimaron de acuerdo con los procedimientos de trabajo, teniendo en cuenta una carga de trabajo de cinco operaciones al año y utilizando escenarios muy conservadores. Como resultado, se obtuvo que las dosis efectivas totales serán de aproximadamente 5 mSv/año lo que permite cumplir con el límite anual establecido en la regulación nacional vigente para esta categoría de personal expuesto.

Para la estimación de la dosis del público se consideraron a los trabajadores de la instalación que recibe el servicio y a la población de las zonas por las que circule el vehículo con los materiales radiactivos al ser transportados hasta y desde la instalación. Se consideró que las dosis que recibirán los miembros del público dependerán del tiempo en que los mismos se mantengan en zonas cercanas ya sea al local de almacenamiento temporal de la fuente o límite que marca la zona supervisada. En estos casos se tuvo en cuenta que las tasas de dosis en los alrededores de los bultos (distancia de 1 m) son del orden de las unidades de  $\mu\text{Sv/h}$  y que la tasa de dosis máxima en el perímetro de la zona supervisada no debe superar los  $2.5 \mu\text{Sv/h}$ . Como resultado se obtuvo que las dosis anuales serán del orden de las decenas de  $\mu\text{Sv}$ , lo que igualmente cumple con los límites anua-

les impuestos en la regulación para los miembros del público [8].

Una vez establecido que en condiciones normales de operación la práctica cumple con los requisitos reguladores en relación con los límites de dosis, se procedió a estimar las dosis potenciales para las situaciones accidentales previsibles. La identificación de los sucesos iniciadores se realizó mediante un Análisis Qué – Sí y el criterio de expertos mientras que la evaluación de los riesgos de estos sucesos se realizó utilizando la Metodología de Matrices de Riesgo, la cual tiene como objetivo final clasificar el riesgo por niveles y que se considera suficiente para la toma de decisiones en relación con la seguridad de las operaciones a realizar.

Los sucesos iniciadores se identificaron para cada etapa de las operaciones, incluidas las de transportación y almacenamiento temporal de los materiales radiactivos. Un resumen de los mismos se presenta en la tabla 1.

Para cada uno de los sucesos iniciadores (SI) se identificaron las personas afectadas (operador o público), la frecuencia de ocurrencia del evento (f), las barreras de seguridad para cada uno y la probabilidad de falla (P) del conjunto de barreras y se evaluaron las consecuencias radiológicas (C) [7]. Este análisis permitió evaluar el riesgo de cada evento postulado. Los resultados de este análisis se resumen en la tabla 2.

Un análisis estadístico de los resultados obtenidos con la aplicación de la matriz de riesgo (primer filtrado)

**Tabla 1.** Resumen de los sucesos iniciadores identificados

Etapa	Código	Suceso Iniciador
<b>Transporte de los materiales radiactivos</b>	<b>SI-1</b>	Accidente de tránsito
	<b>SI-2</b>	Error humano (acción deficiente o muy rápida) que dé lugar a la caída del bulto radiactivo durante su manipulación
	<b>SI-3</b>	Abandono del vehículo o la carga
	<b>SI-4</b>	Intento de robo de vehículo con o sin intención de apropiación del material radiactivo
	<b>SI-5</b>	Incendio del vehículo que afecte el material radiactivo.
	<b>SI-6</b>	Evento natural (intensas lluvias) que afecte el material radiactivo.
<b>Preparación del radiotrazador</b>	<b>SI-7</b>	Error humano (acción deficiente o demasiado rápida) que dé lugar a la caída de frasco que contiene el trazador con derrame de su contenido.
	<b>SI-8</b>	Intento de acceso no autorizado a la zona de trabajo
<b>Inyección del radiotrazador</b>	<b>SI-9</b>	Fallo del dispositivo inyector que da lugar a derrame del trazador fuera del volumen a estudiar
	<b>SI-10</b>	Intento de acceso a la zona donde se está realizando el estudio
<b>Adquisición de datos/muestreo</b>	<b>SI-11</b>	Error humano (acción deficiente o rápida) que provoque el derrame del contenido de la muestra
<b>Almacenamiento de materiales radiactivos</b>	<b>SI-12</b>	Error humano (acción deficiente) que dé lugar a caída de bulto radiactivo.
	<b>SI-13</b>	Intento de acceso no autorizado al local de almacenamiento
	<b>SI-14</b>	Intento de robo de material radiactivo
	<b>SI-15</b>	Incendio que afecte el material radiactivo.

**Tabla 2.** Resumen de los valores asignados a las variables independientes f, P y C y resultado de la aplicación de la matriz de riesgo (R) para cada suceso iniciador identificado.

SI	f	P	C	R
<b>SI-1</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-2</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	C <sub>B</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-3</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>M</sub>
<b>SI-4</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-5</b>	f <sub>MB</sub>	P <sub>B</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-6</b>	f <sub>M</sub>	P <sub>M</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>M</sub>
<b>SI-7</b>	f <sub>M</sub>	P <sub>B</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>M</sub>
<b>SI-8</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>M</sub>
<b>SI-9</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>A</sub>	C <sub>B</sub>	R <sub>M</sub>
<b>SI-10</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	C <sub>B</sub>	R <sub>B</sub>

<b>SI-11</b>	f <sub>M</sub>	P <sub>A</sub>	C <sub>B</sub>	R <sub>M</sub>
<b>SI-12</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>M</sub>	C <sub>B</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-13</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>B</sub>	C <sub>B</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-14</b>	f <sub>B</sub>	P <sub>M<sub>B</sub></sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>B</sub>
<b>SI-15</b>	f <sub>M<sub>B</sub></sub>	P <sub>B</sub>	C <sub>M</sub>	R <sub>B</sub>

se presenta en la tabla 3. Como puede apreciarse, de los 15 sucesos iniciadores identificados, se obtienen seis secuencias accidentales con Riesgo Medio, de las cuales cuatro tendrían consecuencias moderadas. Cinco de los sucesos iniciadores identificados pueden afectar tanto a trabajadores ocupacionalmente expuestos como a miembros del público, cuatro de los cuales tienen riesgo bajo, mientras que uno es de riesgo medio [8].

**Tabla 3.** Análisis estadístico de los resultados obtenidos con la aplicación de la matriz de riesgo (primer filtrado).

Número de sucesos analizados	15	
Con consecuencias sobre el trabajador ocupacional	9	60.0%
Con consecuencias sobre miembros del público	11	73.3%
Con Consecuencias Muy altas	0	0
Con Consecuencias Altas	0	0
Con Consecuencias Moderadas	4	60.0%
<b>Resultados</b>		
Secuencias con Riesgo Muy Alto	0	0
Secuencias con Riesgo Alto	0	0
Secuencias con Riesgo Medio	6	40.0%
Con riesgo Medio y Consecuencias Muy Altas	0	0
Con riesgo Medio y consecuencias Altas	0	0
Con riesgo Medio y Consecuencias Moderadas	4	26.7%
Con Riesgo Medio y Consecuencias Bajas	2	13.3%
Secuencias con riesgo Bajo	9	60.0%

## Discusión

Atendiendo a que los riesgos evaluados fueron de niveles medio y bajo, sin que en ningún caso las consecuencias radiológicas sean altas ni muy altas, no se consideró necesario realizar un análisis más detallado (en el cual se tendría en cuenta el tipo de barrera, así como el resto de las defensas – reductores de frecuencia y de consecuencias).

Los resultados de la evaluación de seguridad se incluyeron dentro del programa de capacitación del personal que realiza la práctica y se utilizaron como referencia para desarrollar un plan de respuesta a emergencias, donde se incluyeron todos los eventos iniciadores de secuencias accidentales previamente identificadas.

Una vez evaluada la documentación presentada por la Autoridad Reguladora Nacional, le fue otorgada a nuestra entidad la Licencia de Operación para la práctica de trazadores radiactivos, bajo el amparo de la cual se han realizado un grupo de estudios que han permitido evaluar el funcionamiento de sistemas de gestión de

residuales líquidos de diferente tipo, así como validar la metodología desarrollada para la medición de flujo.

Hasta el momento, todas las operaciones se han realizado cumpliendo los procedimientos operacionales y de seguridad, sin que ocurran sucesos radiológicos y con valores de dosis efectivas para los trabajadores ocupacionalmente expuestos por debajo de los niveles de registro (0.1 mSv/operación) lo que permite constatar las condiciones de seguridad de la práctica. Este resultado corrobora además los amplios márgenes de seguridad del análisis inicial, lo que permitirá la realización de una mayor cantidad de operaciones al año.

## Conclusiones

Se desarrolló el análisis de seguridad de la práctica de trazadores radiactivos en la industria durante el cual se postularon 15 sucesos iniciadores de posibles secuencias accidentales, cuyos riesgos fueron evaluados empleando la metodología de Matrices de Riesgo.

El resultado del análisis de seguridad demostró que ninguna de las secuencias accidentales identificadas presentaba riesgos ni altos ni muy altos, que seis tienen riesgo medio, aunque ninguno de ellos con consecuencias radiológicas altas ni muy altas por lo que se concluyó que es posible realizar la práctica en condiciones de seguridad.

Como resultado de la evaluación de la documentación presentada, le fue otorgada al CPHR la Licencia de Operación para la práctica con trazadores radiactivos bajo el amparo de la cual se han realizado varios estudios de sistemas de gestión de residuales líquidos sin que ocurran sucesos radiológicos y con resultados de la vigilancia radiológica que demuestran el adecuado estado de seguridad de la práctica.

## Referencias bibliográficas

- [1]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiotracer Applications in Industry - A Guidebook. TRS No.423. Vienna: IAEA, 2004.
- [2]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Use of radiotracers to study surface water processes. IAEA-TECDOC-1760. Vienna: IAEA, 2015.
- [3]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Industrial applications of sealed radioactive sources. IAEA-TECDOC-1925. Vienna: IAEA, 2020.
- [4]. Colectivo de autores. Protección radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares. CPHR y CNSN. La Habana, 2002.
- [5]. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Reglamento sobre notificación y autorización de prácticas y actividades asociadas al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes. Resolución No. 334/2011.

- [6]. Centro Nacional de Seguridad Nuclear. Evaluación de seguridad de prácticas y actividades asociadas al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes. Guía de Seguridad. Resolución No. 17/2012. La Habana, 2012.
- [7]. Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores. Aplicación del método de la matriz de riesgo en radiografía industrial. Volumen 1. Texto Principal. Junio, 2016.
- [8]. Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR). Expediente de seguridad de la práctica de trazadores radiactivos. Versión 3. Junio, 2021.

**Recibido:** 14 de julio de 2021

**Aceptado:** 24 de septiembre de 2021

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

**CRedit / Gestión de proyectos:** Niurka González Rodríguez. **Análisis formal:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez. **Conceptualización:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez. **Conservación de datos:** Niurka González Rodríguez. **Redacción - primera redacción:** Niurka González Rodríguez. **Redacción - revisión y edición:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez. **Investigación:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez, Eduardo A. Capote Ferrera, Milagros Derivet Zarzábal. **Metodología:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez, Eduardo A. Capote Ferrera, Milagros Derivet Zarzábal. **Obtención de financiación:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez. **Recursos:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez, Eduardo A. Capote Ferrera, Milagros Derivet Zarzábal. **Supervisión:** Niurka González Rodríguez. **Validación:** Niurka González Rodríguez, Isis Ma. Fernández Gómez, Eduardo A. Capote Ferrera, Milagros Derivet Zarzábal. **Visualización:** Niurka González Rodríguez.