

## Artículo original

# ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA SALUD DE LOS TRABAJADORES DEL TRANSPORTE DE MATERIAL RADIATIVO EN CUBA

## RISK ANALYSIS FOR THE HEALTH OF WORKERS TRANSPORTING RADIO-ACTIVE MATERIAL IN CUBA

Zayda Haydeé Amador Balbona <sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4591-2711>

Antonio Torres Valle <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3352-1665>

Niurka González Rodríguez <sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4131-7058>

<sup>1</sup> Centro de Isótopos, La Habana, Cuba

<sup>2</sup> Facultad de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

<sup>3</sup> Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, La Habana, Cuba

\* Correspondencia: [zabalbona@centis.edu.cu](mailto:zabalbona@centis.edu.cu), [zayda.amador@infomed.sld.cu](mailto:zayda.amador@infomed.sld.cu)

### Resumen

**Introducción:** El transporte de material radiactivo (TMR) en Cuba es realizado principalmente por el Centro de Isótopos y el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones. **Objetivo:** Analizar los riesgos radiológicos para la salud de los trabajadores del TMR en Cuba. **Material y método:** Se determinaron los riesgos inherente y residual, las etapas del proceso y las medidas más importantes, así como las consecuencias. La matriz de riesgo se convirtió en el análisis de los modos y efectos de fallo. Se establecieron las sinergias entre estos y el sistema de aprendizaje de incidentes. Los modos de fallo, etapas y causas básicas más contribuyentes fueron identificados. Se utilizó el código cubano SECURE MR-FMEA 3.0. **Resultados:** Se obtuvo un nivel medio de riesgo, pero existieron secuencias accidentales con consecuencias muy altas. La transportación al aeropuerto y la conformación de los bultos radiactivos fueron las de mayor aporte. Las medidas preventivas relevantes son la capacitación del personal del transporte y la inspección técnica del vehículo. Las consecuencias altas para público fueron del 16 %, y las medias para trabajadores del 34,7 %. La contaminación transitoria en las superficies externas y el blindaje deficiente de las fuentes radiactivas selladas en los bultos tienen mayor coincidencia con el reporte. El incumplimiento de lo establecido es la causa básica de fallo predominante. **Conclusiones:** Se facilita la toma de decisiones para el control del riesgo radiológico del transporte de material radiactivo en Cuba a partir del empleo de la metodología que se propone en esta investigación.

**Palabras clave:** salud de los trabajadores, riesgos por radiación, transporte de material radiactivo

### Abstract

**Introduction:** There is the transport of radioactive material (TMR) in Cuba carried out mainly by the Isotope Center and the Radiation Protection and Hygiene Center. **Objective:** To analyze the radiological risks for the workers' health of transport of radioactive material in Cuba. **Material and method:** Inherent and residual risks, process stages and most important measures, as well as consequences were determined. The risk matrix became the analysis of failure modes and effects. Synergies between these and the incident learning system were established. The most contributing identified were among failure modes, stages and root causes. There used the Cuban code SECURE MR-FMEA 3.0. **Results:** There obtained a medium level of risk, but there were accidental sequences with very high consequences. The transportation to the airport and the conformation of the radioactive packages were the ones with the greatest contribution. The relevant preventive measures are the training of transport personnel and the technical inspection of the vehicle. The high consequences for the public are 16 % and the average for workers 34.7 %. Transient contamination on external surfaces and poor shielding of sealed radioactive sources in packages are more consistent with the report. Non-compliance with the established is the predominant basic cause of failure. **Conclusions:** This paper allows the decision-making to control the radiological risk of the transport of radioactive material in Cuba increased from the use of the methodology proposed in this research.

**Keywords:** workers' health, radiation risks, transport of radioactive material

Recibido: 22 de enero de 2021

Aprobado: 20 de junio de 2021

### Introducción

El transporte de material radiactivo (TMR) es una actividad de apoyo a las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el mundo. Los principales transportistas en Cuba son el Centro de Isótopos (CENTIS) y el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR).

El estado del arte muestra que existe una cantidad limitada de publicaciones sobre el uso de los métodos semicuantitativos para el análisis del riesgo radiológico en el TMR.

Para evaluar los riesgos del transporte de una fuente radiactiva sellada de categoría 1, se empleó el método de la matriz de riesgo.<sup>(1)</sup> Este método semicuantitativo permite identificar las medidas más importantes para el control del riesgo, pero no un análisis causal de los sucesos radiológicos que se estudian.

Además, no existe reporte del uso combinado de los métodos prospectivos y reactivos en esta práctica, lo que limita la incorporación de la incidencia de eventos a nivel internacional y de sus causas.

El análisis de riesgo es parte de la evaluación de seguridad y constituye un requisito regulador en Cuba.<sup>(2,3)</sup>

El CENTIS diseña, remite y transporta bultos tipo A con fuentes radiactivas no selladas. El CPHR, por su parte, realiza la actividad para fuentes radiactivas selladas, tanto en uso como en desuso, en bultos de tipo A y B, así como desechos radiactivos como fuentes no selladas en bultos industriales (BI-1).<sup>(4)</sup>

El objetivo de esta investigación es analizar el riesgo radiológico para los trabajadores y el público en las operaciones por carretera de estos dos principales transportistas en Cuba.

## Material y método

Se crearon los modelos en la matriz de riesgo para el CENTIS y el CPHR a partir de las diferencias en sus procesos de transporte, el inventario radiactivo y las características de sus remesas.

La relación de los sucesos iniciadores y sus frecuencias fueron tomadas de los reportes internacionales y propios para el CENTIS, así como de los criterios de expertos, incluidos los de la Dirección de Seguridad Nuclear de la Oficina de Regulación y Seguridad Ambiental (DSN-ORSA).<sup>(5-11)</sup>

Se utilizó la combinación de los métodos de la matriz de riesgo (MR), el análisis de los modos y efectos de fallo (FMEA, por sus siglas en inglés) y el sistema de aprendizaje de incidentes (ILS, por sus siglas en inglés) para trabajadores y público. Este enfoque integrado permite identificar los principales contribuyentes al riesgo y que los tomadores de decisión optimicen esfuerzos y recursos para eliminar en la organización sus debilidades y utilizar las buenas prácticas de seguridad y calidad.

Tomando en cuenta los aspectos básicos, se aplicó el método de la matriz de riesgo como un producto de tres variables independientes: la frecuencia de un evento indeseado (suceso iniciador), la probabilidad de falla de las barreras provistas y la gravedad del daño potencial (consecuencias).<sup>(12)</sup>

Las medidas de seguridad o defensas son las implementadas en la organización para evitar, detectar o detener una exposición accidental o mitigar sus consecuencias. Estas pueden ser tecnológicas (tales como las alarmas) u organizacionales (tales como los procedimientos o chequeos duplicados para evitar o detectar un error). Todas son parte del principio de defensa en profundidad. Las que reducen la probabilidad de ocurrencia de los sucesos iniciadores y sus consecuencias son los llamados «reductores de frecuencia» (RF) y «reductores de consecuencias» (RC), respectivamente. Estas, junto a las barreras (medidas para detectar y evitar la progresión del

suceso), son las denominadas en esta investigación como *elementos de control*.

Se emplearon cuatro niveles de riesgo en el primer análisis de los sucesos, los cuales fueron nivel muy alto de riesgo (RMA), alto (RA), medio (RM) y bajo (RB). Las secuencias accidentales con RB no requieren de un análisis posterior, de manera que la atención deberá concentrarse en las que posean RMA y RA. Los de RM deben analizarse en función de sus consecuencias. Se definió la robustez o efectividad de cada elemento de control como blanda (B), normal (N) o robusta (R).

Los métodos que se revisaron para el análisis de seguridad de los materiales de fácil dispersión son los que se utilizan para calcular las cantidades peligrosas de material radiactivo por radionucleido (los valores de D) y la conocida como el sistema Q, que es descrita en el manual que acompaña el reglamento para el transporte seguro de estos materiales.<sup>(13,14)</sup> La primera de estas fue seleccionada por reportar el valor de la actividad del  $I^{131}$  para la aparición del efecto determinístico en la tiroides y que define los niveles de consecuencias para el CENTIS. Para el CPHR se tomó la clasificación de las fuentes radiactivas selladas.<sup>(2)</sup>

El análisis de los riesgos radiológicos se realizó con el código cubano SECURE-MR-FMEA versión 3.0.<sup>(15)</sup>

Se obtuvieron los riesgos inherente y residual. Igualmente, las principales defensas identificadas consideraron su participación porcentual e impacto en el riesgo al ser eliminadas.

Se determinó la importancia de las consecuencias para los trabajadores y el público, así como la contribución del error humano en el riesgo.

Se aplicó un enfoque integrador con el empleo combinado de la matriz de riesgo, el FMEA e ILS dirigido al análisis de las causas básicas de fallo, para su consideración por cada organización en la elaboración del plan de mejora de la seguridad y calidad. La conversión de la matriz al FMEA se realizó a partir de la equivalencia de sus variables.<sup>(16)</sup>

Se utilizó un listado estandarizado de causas-raíces y una similar estructura de la base internacional de incidentes creada y de la escala de gravedad, a la del sistema del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) denominado SAFRON.<sup>(17-19)</sup>

La escala de las variables del FMEA reportada para los pacientes en radioterapia se adaptó a los trabajadores y público.<sup>(20)</sup>

Se seleccionaron los principales subprocesos, etapas, modos de fallo (MF) y causas básicas de fallo en correspondencia con el número de prioridad del riesgo, el valor de severidad, el índice de severidad (ISev) y el índice de calidad (IQ).<sup>(21)</sup>

Se siguió la aproximación conservadora de asignar los mismos valores de ocurrencia (O), severidad (S), no detectabilidad (D) y el número de prioridad del riesgo

(NPR) de la fila original a todas las causas desplegadas en la nueva tabla del FMEA.

Se crearon el diagrama de Ishikawa y los árboles de fallo del proceso. Se utilizó un código de colores para señalar los subprocesos, etapas, MF y causas más importantes.

Como el TMR es una actividad muy regulada, fue necesario reducir los valores de referencia con respecto a los utilizados en la medicina con radiaciones ionizantes.

Con el rojo, se indicaron aquellos MF que se localizan en el grupo del 20 % más importante (principio de Pareto).<sup>(22)</sup> Este 20 % se calculó ordenándolos primero por su NPR y después encontrando la suma parcial de los más importantes hasta que estos acumularan el 20 % de la NPR total (suma de todas las NPR del estudio). En segundo lugar, en color azul, se ubicaron los que poseían  $NPR \geq 40$  y severidad  $Sev \geq 4$ . En tercer lugar, en color verde, estuvieron los de  $NPR \geq 40$  y  $Sev < 4$ . Finalmente, en color amarillo, se encontraron los de  $Sev \geq 4$  y  $NPR < 40$ .

Se completó la relación de las causas más importantes con las provenientes del análisis de los sucesos registrados (sinergia FMEA-ILS), identificadas previamente por el grupo de expertos que realizaron la investigación.

La base internacional de incidentes (DBI) se creó con el reporte de 16 países hasta noviembre del 2019. Para la clasificación de los sucesos potenciales incluidos, se modificó la denominación de los sucesos representativos con su adaptación al transporte de material radiactivo y los criterios para sus consecuencias, con la aplicación a trabajadores ocupacional-

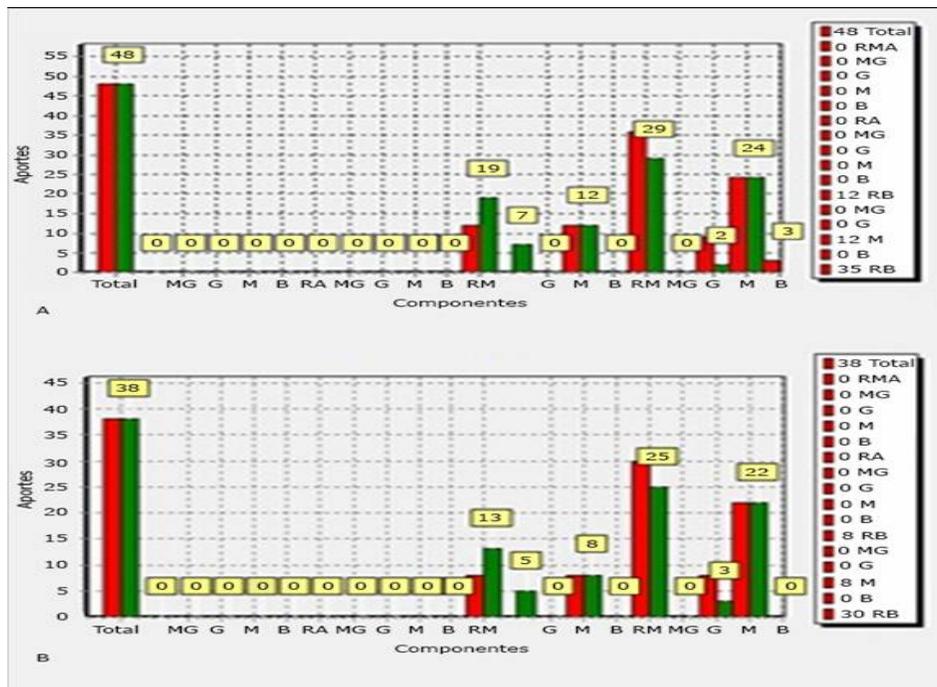
mente expuestos (TOE) y al público, de la escala de cinco niveles desarrollada para la radioterapia.<sup>(23)</sup> Estos cambios no se habían efectuado con anterioridad para ninguna otra práctica médica o industrial.

## Resultados

Se obtuvo un modelo del proceso con el método de la matriz de riesgo para cada transportista. Así, el del CENTIS cuenta con 11 etapas, 48 sucesos iniciadores (SI), 71 barreras, 83 reductores de frecuencia (RF) y 31 reductores de consecuencias (RC). En tanto, el del CPHR dispone de ocho etapas, 38 SI, 50 barreras, 48 RF y 25 RC.

Las dos prácticas del TMR estudiadas muestran, como nivel de riesgo superior, el nivel medio desde el primer cribado por el método de la matriz de riesgo, por lo que se tratan las secuencias accidentales (SA) con consecuencias muy graves o muy altas. Esto representa en caso del CENTIS el 14,58 % y para el CPHR el 13,16 % del total de secuencias accidentales (siete y cinco, respectivamente). Este comportamiento está determinado por la realización por el CENTIS de una mayor cantidad de operaciones. El riesgo residual que se obtuvo se presenta en color rojo en la figura 1. Este gráfico comparativo refleja también, pero en color verde, el riesgo inherente para cada transportista.

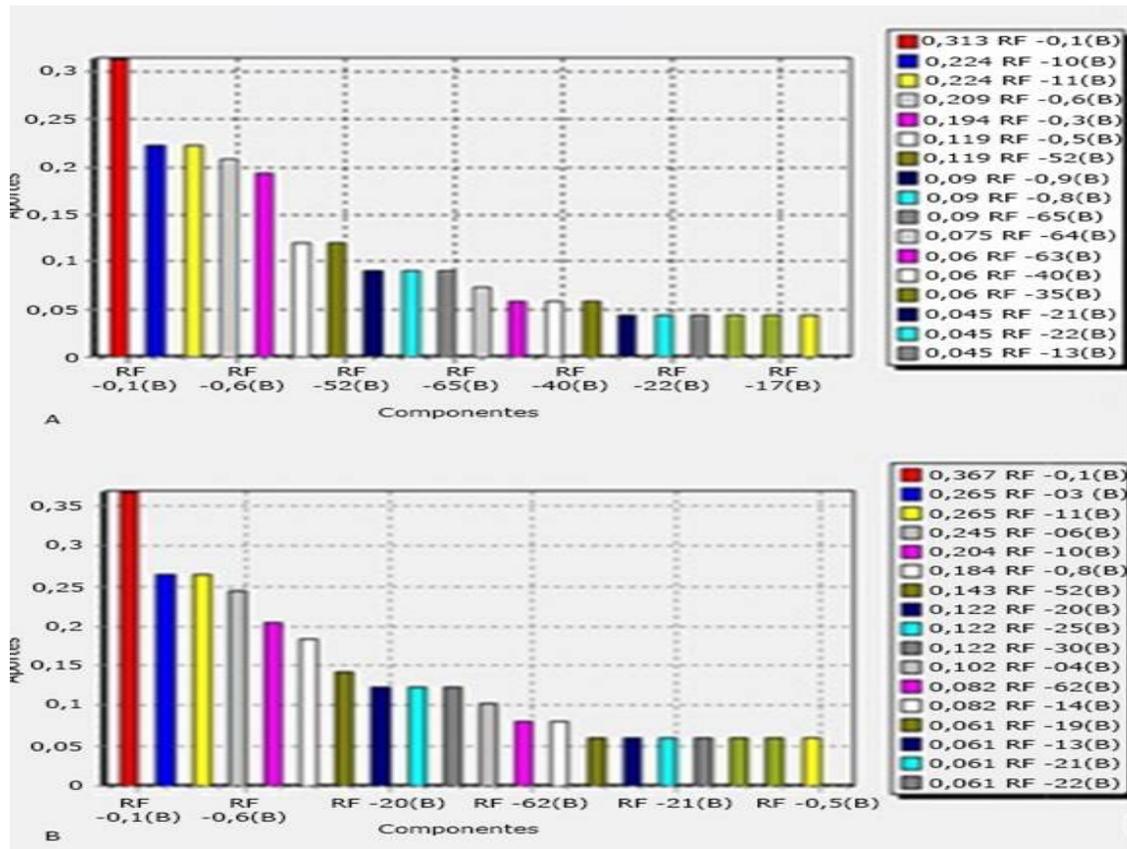
**Figura 1**  
**Histograma comparativo riesgo inherente frente a riesgo residual para el CENTIS (arriba) y el CPHR (abajo) en el transporte de material radiactivo. Para cada nivel de riesgo existen consecuencias muy graves (MG), graves (G), medias (M) y bajas (B)**



Como medidas preventivas o RF más significativas por su participación porcentual se identificaron las que se reflejan en la figura 2. Para ambos transportistas se destacan la capacitación del personal del transporte (RF-

01[B]) y la inspección técnica del vehículo, (RF-10[B]). No se determinó el perfil de riesgo al eliminar los RF por su baja incidencia (predominio de robustez blanda).

**Figura 2**  
**Histograma del incremento en la cantidad de secuencias accidentales del nivel de riesgo al eliminarse los reductores de frecuencia con robustez normal (N) y blanda (B). Arriba para el CENTIS y abajo para el CPHR**



Se obtuvo que las barreras más importantes (figura 3), al ser eliminadas, son la notificación al centro (B-03[B]) y el procedimiento de acción ante emergencia en el transporte de material radiactivo del grupo de intervención (B-04[B]).

Como medidas para reducir las consecuencias de los incidentes o RC de mayor aporte al riesgo, se hallaron por su participación porcentual, análisis de lecciones aprendidas de incidentes radiológicos (RC-04[B]), el plan para emergencia radiológica en el TMR (RC-02[B]) y el análisis de los resultados de la dosimetría externa personal (RC-01[B]) (figura 4). Los RC también tienen una baja incidencia en el riesgo, razón por lo que no se consideró su impacto al eliminarse.

De la matriz de riesgo para las dos organizaciones se obtuvo que las consecuencias de los sucesos son graves

o altas para el público en el 12 y 16 %, respectivamente, del total de secuencias accidentales (SA). El valor más bajo corresponde al CENTIS por tener una cantidad superior de SA. Además, los trabajadores tienen el porcentaje mayor de las consecuencias medias para el CPHR, debido a su exposición durante la conformación de los bultos con fuentes radiactivas selladas en desuso (figura 5).

Para ambos transportistas, la operación hacia el aeropuerto es la etapa del proceso con la mayor contribución al riesgo. El CENTIS tiene un inventario radiactivo que puede superar el valor de actividad (A) de 200 GBq para el total de la remesa con  $I^{131}$  en dicha operación, el que provoca la aparición del efecto determinístico (D) de tiroiditis aguda por radiación.<sup>(13)</sup> El CPHR transporta fuentes radiactivas selladas de categoría 3 ( $1 \leq A/D < 10$ ) para su devolución a proveedores (figuras 6 y 7).<sup>(2)</sup>

Figura 3

Histograma del incremento en la cantidad de secuencias accidentales del nivel de riesgo al eliminarse las barreras (B) con robustez normal (N), blanda (B) y robusta (R). Arriba para el CENTIS y abajo para el CPHR

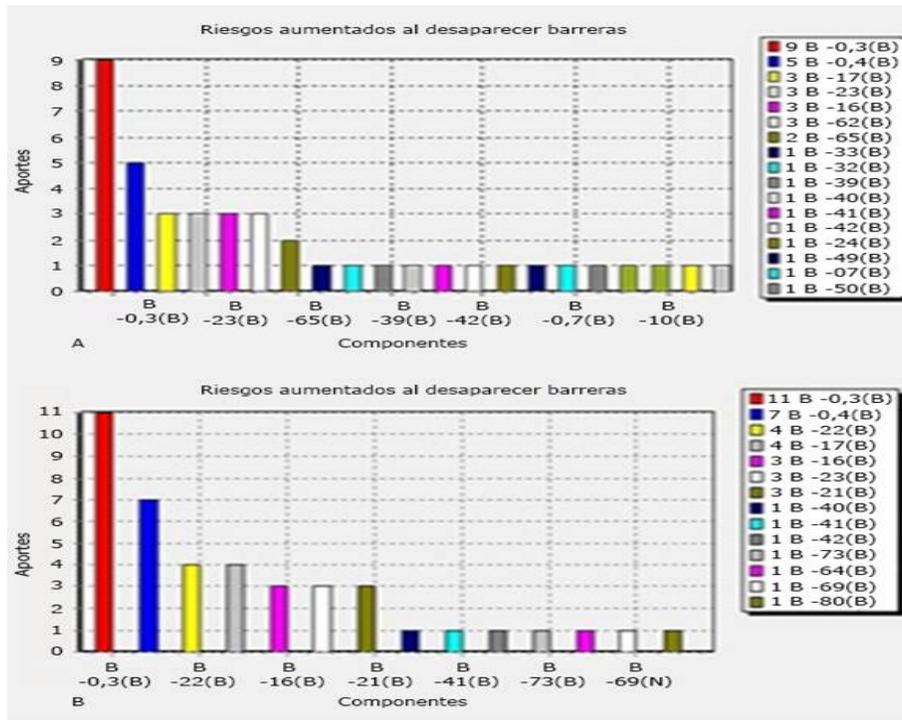
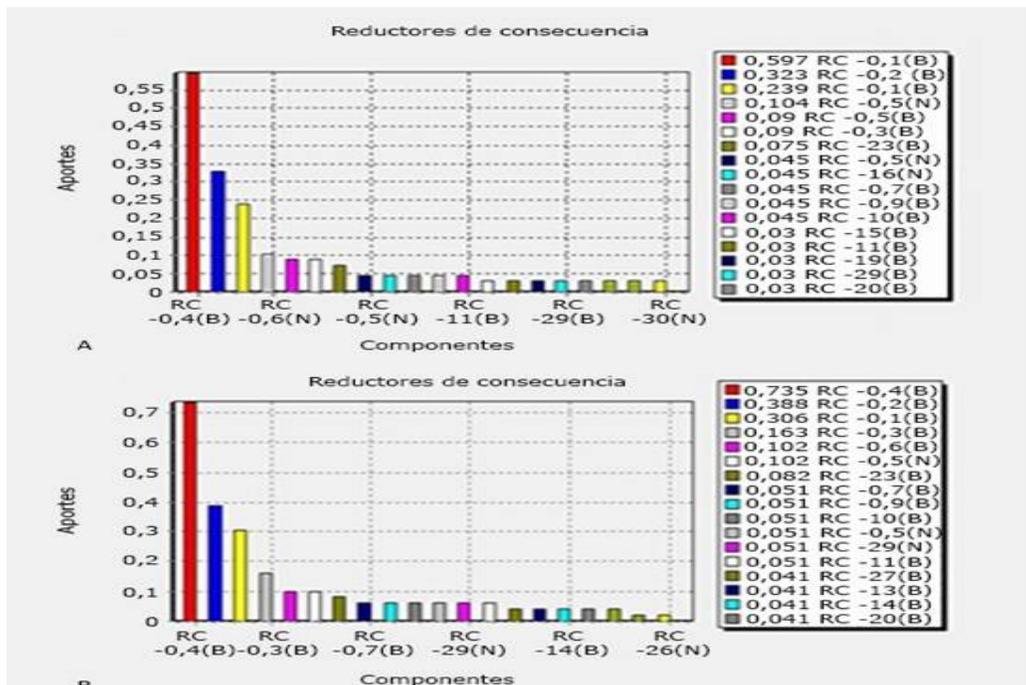
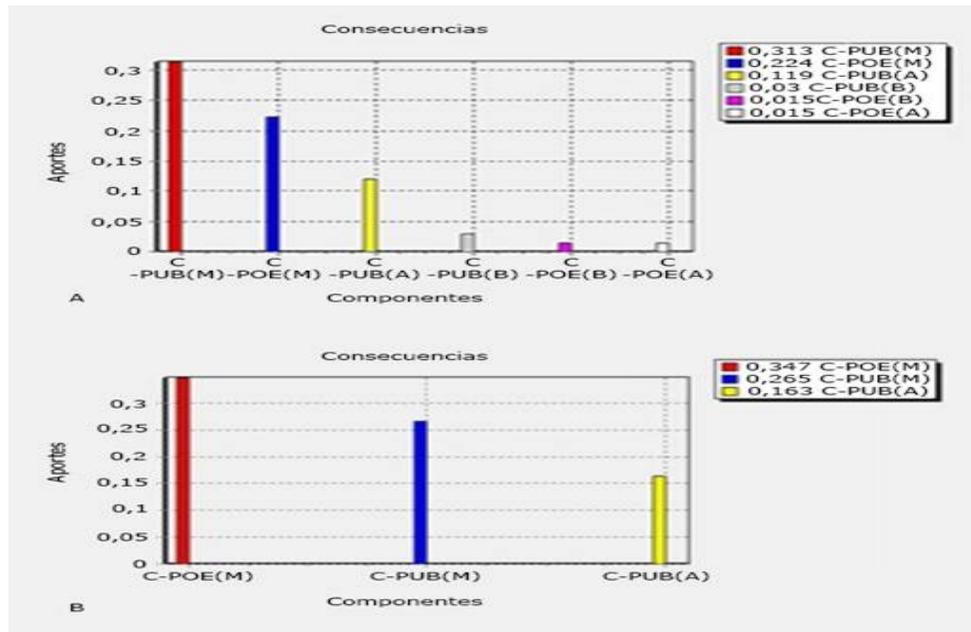


Figura 4

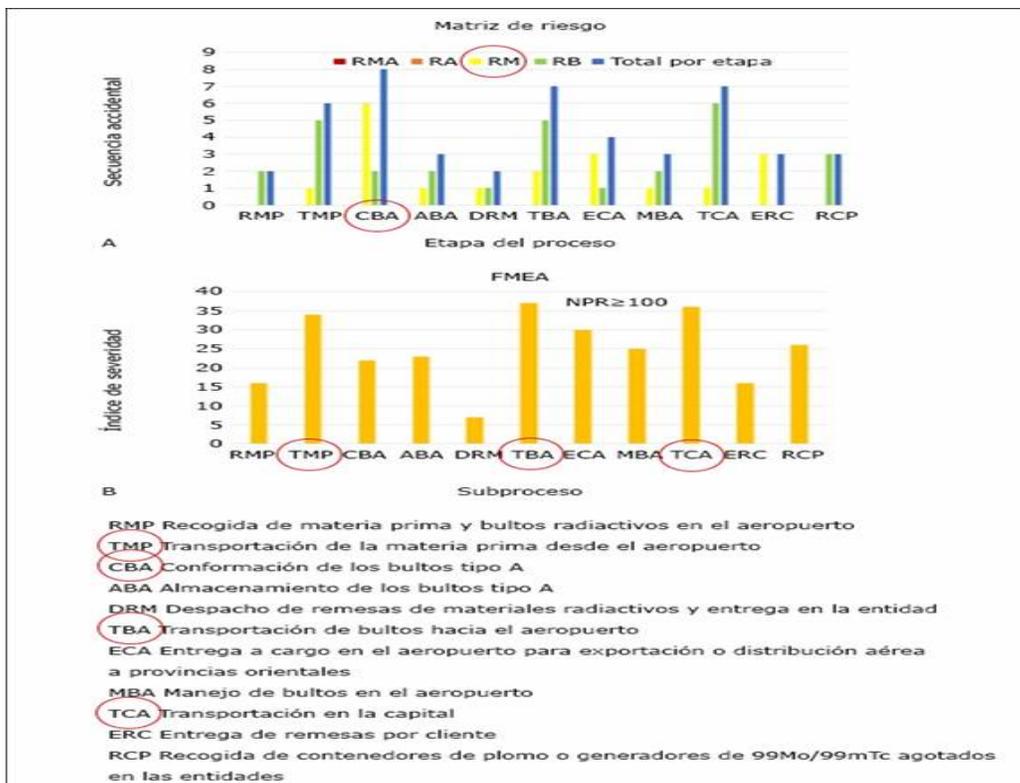
Histograma de la participación porcentual de los reductores de consecuencias (RC) con robustez normal (N) y blanda (B). Arriba para el CENTIS y abajo para el CPHR



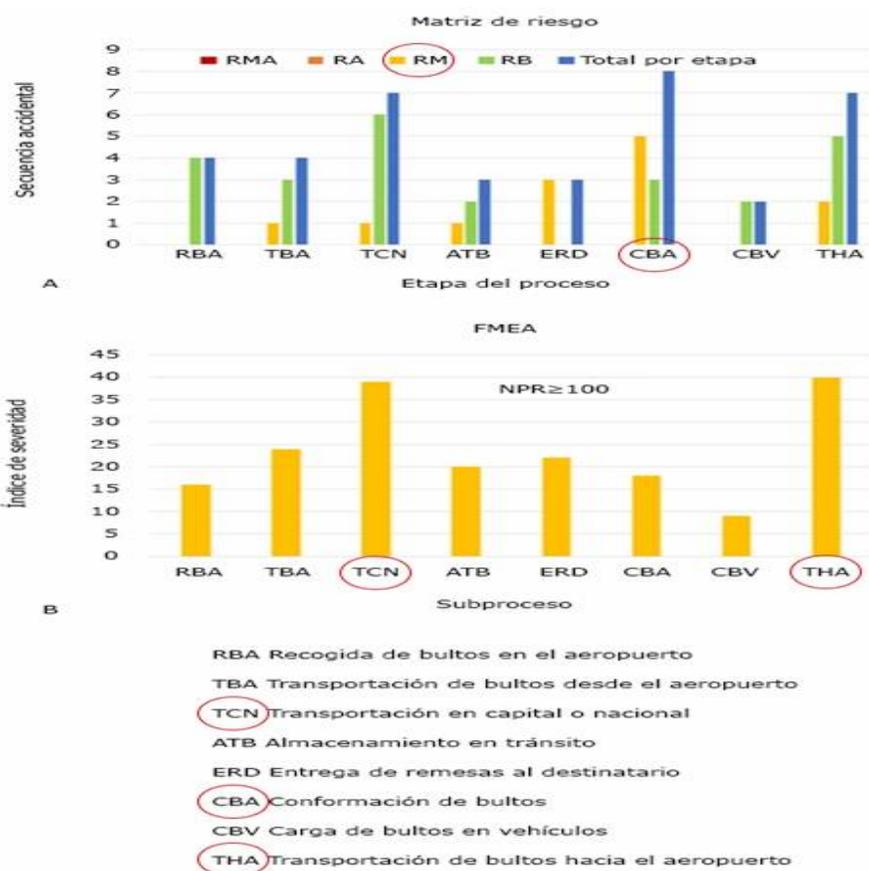
**Figura 5**  
Fracción del total de consecuencias por nivel de riesgo residual para trabajadores y público (PUB) del CENTIS (arriba) y el CPHR (abajo). Consecuencias muy altas (MA), altas (A), medias (M) y bajas (B)



**Figura 6**  
Etapas o subprocesos de mayor contribución al riesgo para el CENTIS



**Figura 7**  
Etapas o subprocesos de mayor contribución al riesgo para el CPHR



En el TMR en Cuba, el aporte del error humano al riesgo es como máximo del 81,25 %, el cual pertenece al CENTIS, por ser el de mayor cantidad de SA. La falla de equipo se ha considerado para la ocurrencia de incendio y explosión en el vehículo y la rotura de este en un lugar de concentración de público, pero su influencia es mayor por su consideración en las etapas de transportación y su afectación a trabajadores y al público.

Del FMEA obtenido, se identificaron las causas básicas más importantes para el riesgo. Estas son, por orden de importancia, la 1.3, prácticas, protocolos, procedimientos o normas (incumplidos), la 1.2, prácticas, protocolos, procedimientos o normas (inadecuados), la 5.3, comunicación (inadecuada dirección de la comunicación o información) y la 6.1, desarrollo de habilidades y conocimientos (falta de entrenamiento u orientación [carencia o inadecuado]). Nótese que para ambos transportistas coinciden las causas 1.3 y la 5.3; esta última es la más importante para el CPHR por el orden en que aparece. En la figura 8 pueden verse los valores del índice de severidad (ISEv) para todas las causas señaladas.

El impacto de la eliminación de la causa 1.3 en la cantidad de NPR  $\geq 40$  por causa para el CENTIS se muestra en la figura 9. Obsérvese en color verde este estado, en el que el NPR con esta condición se reduce para la mayoría de las causas, lo que indica la trascendencia de su incidencia.

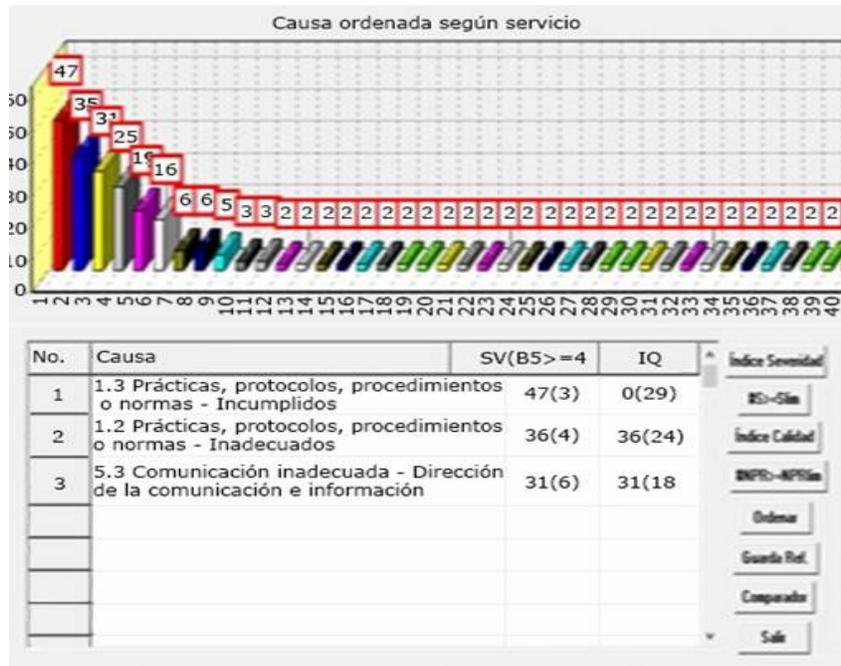
En la figura 10 se puede observar que el reforzamiento de la causa 5.3 en el CPHR provoca un aumento del ISev para los subprocesos 2, 3 y 8 (en color rojo).

La base internacional de incidentes (BDI) que se creó cuenta con un total de 169 registros, principalmente de los Estados Unidos de América, el Reino Unido y Francia. Existen 114 de estos que pertenecen a los incidentes y sucesos potenciales con fuentes radiactivas no selladas, válidos para el CENTIS y el resto mayoritario para el CPHR.

En la tabla se aprecian los criterios y ejemplos representativos que se adoptaron para los sucesos potenciales en el transporte de material radiactivo.

Figura 8

Valores del índice de severidad (ISev) para las causas básicas de fallo del transporte de material radiactivo por el CENTIS (arriba) y el CPHR (abajo)



A



B

Figura 9

Histograma del número de prioridad del riesgo (NPR) por subproceso en el CENTIS, con la condición  $NPR \geq 40$  del transporte de material radiactivo antes (color rojo) y después (color verde) de la eliminación de la causa 1.3

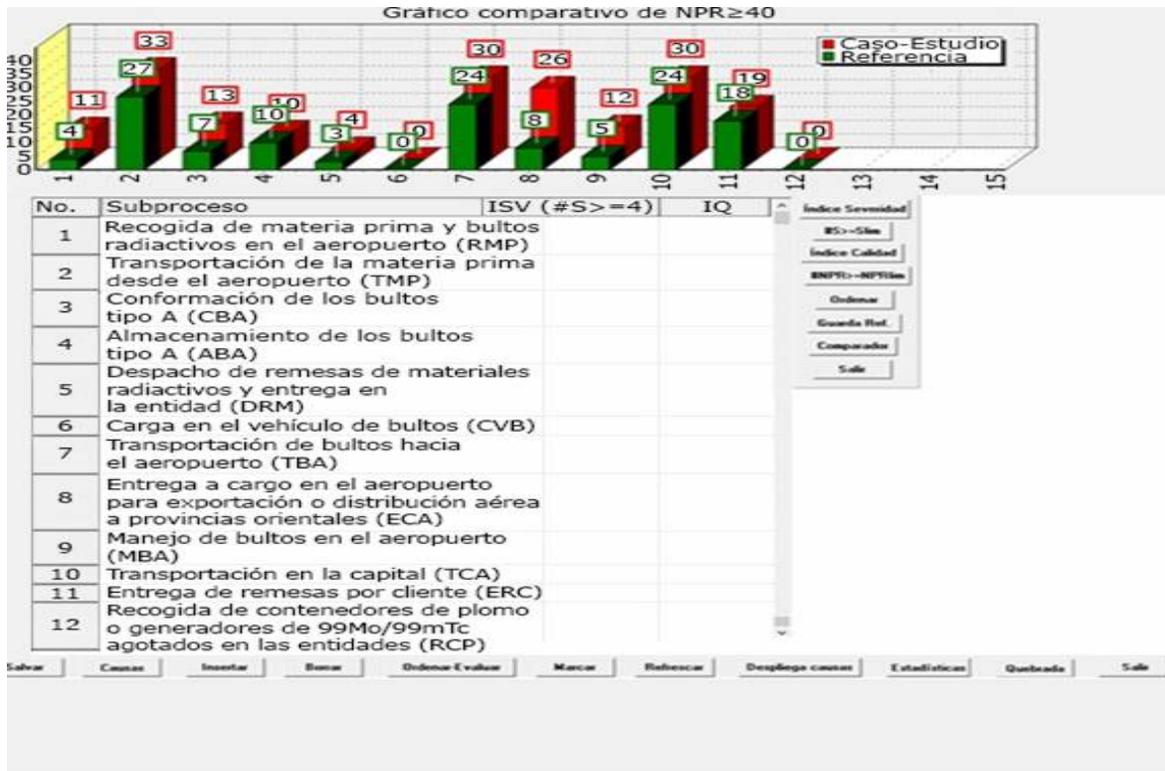


Figura 10

Histograma del índice de severidad (Isev) por subproceso del transporte de material radiactivo en el CPHR, antes (color verde) y después (color rojo) del incremento de la causa 5.3



**Tabla**  
**Definiciones y ejemplos representativos para el índice de los sucesos potenciales, que representa el riesgo potencial de daño a TOE o público en el transporte de material radiactivo**

Índice SP	Criterio	Sucesos representativos
0 (no hay daño potencial)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Suceso que no representa un riesgo posterior en el flujo de trabajo</li> <li>○ Suceso no relacionado con la exposición a las radiaciones ionizantes o la calidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Confusión con la localización telefónica del personal del servicio debido a que estos no se encuentran en un lugar único accesible a todos y en todo momento</li> <li>○ La documentación del TMR es incorrecta para fines de control de los gastos financieros del servicio</li> </ul>
1 (daño leve)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Suceso que puede aumentar el riesgo de errores posteriores</li> <li>○ Suceso que puede causar peligro e inconvenientes, pero sin impacto radiológico para TOE y público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Controles apresurados de la preparación y conformación de los bultos radiactivos</li> <li>○ Toda situación que provoque el retraso de la conformación de los bultos radiactivos y lleve al trabajo apresurado de los que ejecutan el TMR</li> </ul>
2 (daño moderado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Suceso que incrementa el riesgo de posteriores errores críticos</li> <li>○ Desviación de las buenas prácticas; pero sin impacto radiológico obvio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ No empleo de materiales autorizados para la conformación de los bultos radiactivos</li> <li>○ No empleo de vehículo autorizado</li> </ul>
3 (daño potencial severo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Barreras limitadas para la prevención del problema</li> <li>○ Suceso con impacto potencial no crítico o radiológico para TOE y público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Iniciación de incendio en vehículo próximo al del TMR en la vía</li> <li>○ Error en el etiquetado de los bultos</li> <li>○ Presencia de contaminación radiactiva en las superficies externas de los bultos con fuentes radiactivas no selladas</li> </ul>
4 (daño potencial crítico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Barreras extremadamente limitadas para la prevención del problema</li> <li>○ Suceso con impacto potencial crítico o radiológico para TOE y público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Uso de blindajes inadecuados en los bultos radiactivos</li> <li>○ Abandono temporal del vehículo con remesa radiactiva en su interior durante la entrega a clientes</li> <li>○ Sellaje inadecuado de la primera barrera de contención en bultos radiactivos con fuentes no selladas para su transportación aérea</li> </ul>

**Leyenda:** SP sucesos potenciales; TOE: trabajadores ocupacionalmente expuestos; TMR: transporte de material radiactivo

Las secuencias accidentales de mayor coincidencia con los registros de la BDI (sinergia MR-ILS) se pueden apreciar en la figura 11. La contaminación transitoria en las superficies externas de los bultos radiactivos y la conformación de estos con blindaje deficiente son las SA que se deben destacar para el CENTIS y el CPHR, respectivamente. Nótese en este último caso que la pérdida o robo de material radiactivo tiene el mismo comportamiento que la SA citada anteriormente.

La sinergia FMEA-ILS para el CENTIS aporta dos nuevas causas, la 6.1 y la 24.1, cultura de seguridad radiológica y protección física y falta de prioridad a la seguridad radiológica o protección física (figura 12). Por ello, se

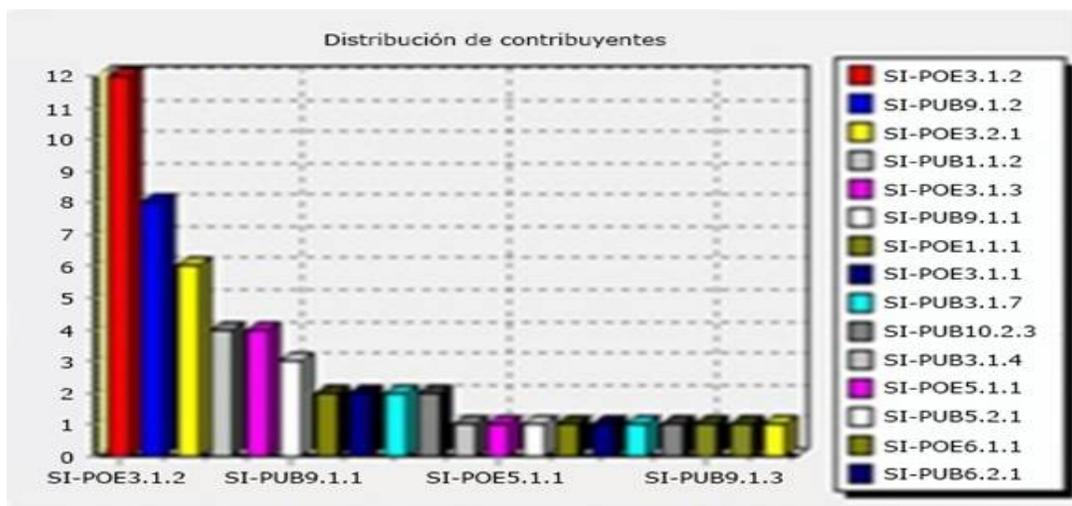
deben adicionar las acciones correctivas para su solución al plan de mejora de la seguridad y calidad.

## Discusión

La presente investigación aporta la identificación de los riesgos radiológicos para los trabajadores y el público a través de un enfoque integrador de los métodos preactivos de matriz de riesgo y FMEA, y el reactivo ILS, aplicada al transporte de material radiactivo.

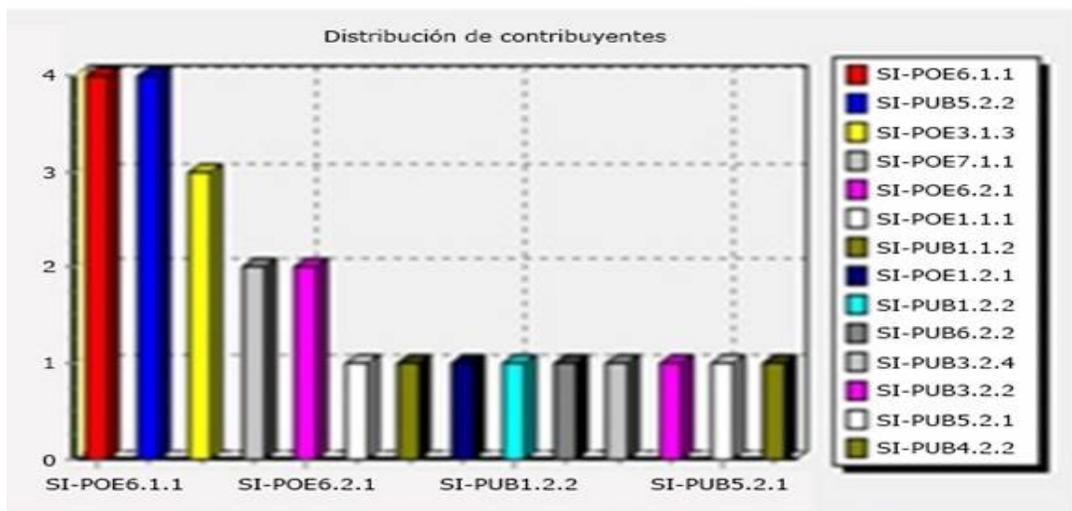
Figura 11

Histograma de las secuencias accidentales que tienen correspondencia con los registros de la base internacional de incidentes para el CENTIS (arriba) y para el CPHR (abajo)



SI-POE3.1.2 Bultos radiactivos tipo A conformados con presencia de contaminación radiactiva transitoria en sus superficies externas (Etapa 3. Conformación de bultos)  
 SI-PUB9.1.2 Deterioro del bulo radiactivo (Etapa 9. Manejo en aeopuerto)  
 SI-POE3.2.1 Deficiente etiquetado de los bultos radiactivos que provoca su manipulación inadecuada (no en función de sus tasas de dosis en contacto reales). (Etapa 3. Conformación de bultos)

A

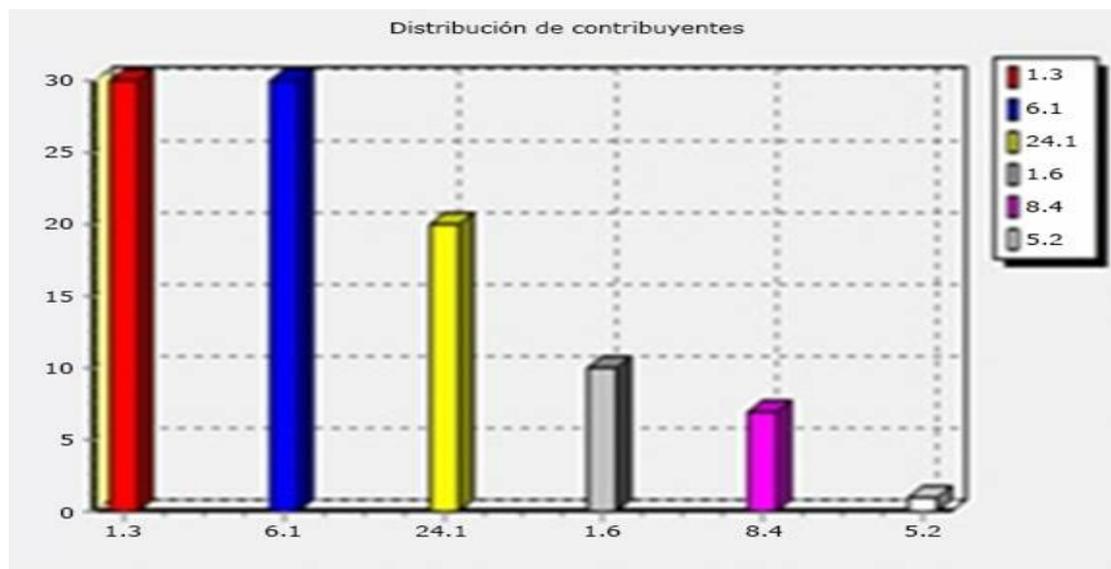


SI-POE6.1.1 Bultos radiactivos conformados con blindaje deficiente  
 SI-PUB5.2.2 Pérdida o hurto de material radiactivo durante la entrega de la remesa al cliente  
 SI-POE3.1.3 Pérdida de contención de material radiactivo (por incendio y explosión en el vehículo u otra causa)

B

Figura 12

Histograma de las causas básicas de fallo de los registros de la base internacional de incidentes para el transporte de material radiactivo por el CENTIS



1.3 Prácticas, protocolos, procedimientos o normas - Incumplidos

6.1 Desarrollo de habilidades y conocimiento - Falta de entrenamiento u orientación (carencia o inadecuado)

24.1 Cultura de seguridad radiológica y protección física - Falta de prioridad a la seguridad radiológica o protección física

Se plantea en otras investigaciones, donde se emplea solamente el método de la matriz de riesgo, que la evaluación previa a la operación de transporte facilita la proyección de medidas de seguridad necesarias para evitar la ocurrencia de sucesos radiológicos o minimizar sus consecuencias.<sup>(1)</sup> De ello, puede determinarse que el uso de los tres métodos citados amplía los resultados que se pueden obtener, pues se enriquece el listado de medidas más importantes en el control del riesgo (con las determinadas a partir de las causas más significativas, obtenidas del FMEA y enriquecidas con la sinergia con el ILS) y se validan los sucesos iniciadores postulados, sus frecuencias de ocurrencia y consecuencias, con el análisis de los reportes de eventos en Cuba y otros países (sinergia MR-ILS).

La matriz de riesgo refleja un riesgo inherente medio con las secuencias accidentales vinculadas al robo con o sin fuerza y la pérdida de material radiactivo, que tienen consecuencias muy altas. Las medidas incorporadas para eliminarlo deben ser consideradas prioritariamente en el plan de mejora de la seguridad y la calidad.

Además, las medidas identificadas por su importancia para el riesgo deben también ser incluidas en este, así como las acciones correctivas dirigidas a erradicar las causas básicas más contribuyentes identificadas del FMEA y de la sinergia FMEA-ILS. Estos aspectos permiten

incrementar la eficiencia y efectividad de la toma de decisiones para mantener controlado el riesgo en la práctica evaluada.

De la cultura de seguridad de la organización, dependerá el éxito del cumplimiento del plan de mejora de la seguridad y la calidad.<sup>(24)</sup>

El empleo combinado de los métodos utilizados para la seguridad radiológica permite eliminar sus desventajas, pues la MR no determina las causas básicas de fallo, el FMEA posterga la definición de la eficacia de las medidas correctivas que se planifican para eliminar dichas causas y el ILS, después de la ocurrencia del suceso, permite implementar medidas al analizar sus causas, con igual incertidumbre sobre su eficacia. Esto fortalece el TMR en Cuba, pues permite resolver con recursos optimizados los problemas más importantes para el riesgo y de esta forma garantizar la seguridad de los trabajadores y el público, con la preparación de la organización para su ejecución exitosa. Hasta el presente, estos métodos se han utilizado de manera independiente o con una combinación que profundiza en las causas básicas de fallo, en otras prácticas con radiaciones ionizantes.

Una limitación de la presente investigación es la ausencia de un grupo evaluador multidisciplinario más amplio, pues además de contar con especialistas de la autoridad reguladora nuclear y de la práctica en estudio

para cada centro, hubiera sido recomendable crear un grupo de trabajo en cada organización.

El análisis del riesgo radiológico aportado por esta investigación permite que la toma de decisiones para su control, con la mejora de la calidad y seguridad del TMR en Cuba, pueda ejecutarse con más eficacia y eficiencia, a partir de la metodología utilizada y las prioridades identificadas. El cumplimiento del plan de mejora de la seguridad y la calidad por cada una de las dos organizaciones transportistas es decisivo para mantener controlado el riesgo, para lo cual es vital el desarrollo de la cultura de seguridad de las organizaciones.

## Bibliografía

- Rosas Y, Daza J. Evaluación de seguridad radiológica para el transporte terrestre de fuentes categoría 1 (60Co) en virtud de arreglo especial aplicando el método de matriz de riesgo. *Rev Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*. 2018;2:12. DOI: <http://dx.doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.2.2018.53>.
- Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Reglamento sobre Notificación y autorización de prácticas y actividades asociadas al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes. La Habana: CITMA; 2012.
- Centro Nacional de Seguridad Nuclear. Guía de Evaluación de seguridad de prácticas y actividades asociadas al empleo de fuentes de radiaciones ionizantes. La Habana; 2012.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos. Edición de 2018. Requisitos de Seguridad Específicos N.º SSR-6 (Rev. 1). Viena:OIEA; 2019 [Internet] [acceso 15/01/2020]. Disponible en: [www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB/1798S.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB/1798S.pdf).
- International Atomic Energy Agency. Input data for quantifying risks associated with the transport of radioactive material, Final report of a co-ordinated research project, 1996-2000. Vienna, 2003.
- RELIR OTHEA. Transport sector- Rupture of a package containing Iodine131.S.f. [Internet] [acceso 08/17/2015]. Disponible en: <http://reilir.cepn.asso.fr/index.php/en/reports.html>.
- Nuclear Security Authority. Experience feedback on transport of radioactive material in France, based on lessons learnt from ASN inspections and events between 2007 and 2011. France; 2012.
- Warner Jones SM, Hughes J, Shaw K. Reporting and recording of accidents and incidents involving the transport of radioactive materials in the UK. Vienna: National Radiological Protection Board; 2003.
- Nuclear Regulatory Commission of the United State of America. Enforcement Process Diagram: NRC; 2021 [Internet] [acceso 10/06/2019]. Disponible en: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event/>.
- Institute of Radiation Protection and Nuclear Safety. Report Safety of the Transport of Radioactive Materials for Civilian Use in France, Lessons learned by IRSN from analysis of significant events reported in 2012 and 2013.ISRN: Technical Publications; 2014.
- James Martin Center for Non-proliferation Studies (CNS) and Nuclear Threat Initiative (NTI).CNS Global Incidents and Trafficking Database 2018 [Internet] [acceso 10/06/2019]. Disponible en: [www.nti.org/trafficking](http://www.nti.org/trafficking).
- Organismo Internacional de Energía Atómica y Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores en Seguridad Nuclear, Radiológica y Física. Aplicación de la Matriz de Riesgo a la Radioterapia. Viena; 2012.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. Cantidades peligrosas de materiales radiactivos, EPR-D-Values-2006.Viena; 2006 [Internet] [acceso 20/07/2018]. Disponible en: <https://www-pub.iaea.org>.
- International Atomic Energy Agency. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 ed.). Specific Safety Guide No. SSG-26. Vienna, 2014 [Internet] [acceso 20/07/2018]. Disponible en: [www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB/1586.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB/1586.pdf).
- Torres A. Manual de usuario SECURE-MR-FMEA 3.0, Programa de análisis de riesgo basado en matriz de riesgo y FMEA. La Habana; 2017.
- Amador Z, Torres A. Conversión de matriz de riesgo a análisis de modos y efectos de fallos. *Rev Cubana de Salud y Trabajo*. 2019 [Internet] [acceso 03/11/2019]; 20(2):3-10. Disponible en: <http://www.revsaludtrabajo.sld.cu/index.php/revsyt/article/view/84>.
- Amador Z, Torres A. Causas básicas de fallos aplicadas al análisis de riesgo en prácticas médicas con radiaciones ionizantes. *Rev Cubana de Salud y Trabajo*. 2019 [Internet] [acceso 03/11/2019];20(2):11-8. Disponible en: <http://www.revsaludtrabajo.sld.cu/index.php/revsyt/article/view/99>.
- International Atomic Energy Agency. Safety in Radiation Oncology, SAFRON 2021 March 2021 [Internet] [acceso 20/06/2019]. Disponible en: <https://rpop.iaea.org/SAFRON>.
- Amador Z, Torres A, Arias M. Acoplamiento de métodos prospectivos y reactivos para análisis de riesgo en medicina con radiaciones ionizantes. *Nucleus*. 2020 [Internet] [acceso 05/01/2020]; 67:33-

8. Disponible en:  
<http://nucleus.cubaenergia.cu/index.php/nucleus/article/view/701>.
20. Saiful Huq M, Fraass B, Dunscombe P, Gibbons J, Ibbott G, Mundt A, *et al*. The report of Task Group 100 of the AAPM: Application of risk analysis methods to radiation therapy quality management. *Med Phys*. 2016 [Internet] [acceso 02/10/2020]; 43(7):4209-62. Disponible en:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>.
21. Da Silva Teixeira F, de Almeida C, Saiful Huq M. Failure mode and effect analysis based risk profile assessment for stereotactic radiosurgery programs at three cancer centers in Brazil. *Medical Physics*. 2016 [Internet] [acceso 02/10/2020]; 43(1):171-8. Disponible en:  
<https://www.iaea.org/resources/article/failure-mode-and-effects-analysis-based-risk-profile-assessment-for-stereotactic-radiosurgery-programs-at-three-cancer-centers-in-brazil-0>.
22. Gutiérrez Pulido H. Calidad total y productividad. 3.<sup>a</sup>ed. México D.F.:Ed. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.; 2010.
23. Nyflot M, Zeng J, Kusano A, Novak A, Mullen T, Gao W. Metrics of success: Measuring impact of a departmental near-miss incident learning system. *Pract Radiat Oncol*. 2015;5:e409-e16. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.prro.2015.05.009>.
24. Centro Nacional de Seguridad Nuclear. Guía-Expectativas del Organismo Regulador sobre la Cultura de Seguridad en las organizaciones que realizan actividades con fuentes de radiación ionizante. La Habana; 2015.

### Conflictos de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

### Contribución de los autores

- Zayda Haydeé Amador Balbona. Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, redacción del borrador original, revisión y edición.
- Antonio Torres Valle. Conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, revisión y edición.
- Niurka González Rodríguez. Conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, revisión y edición.

**Copyright © 2021** : Zayda Haydeé Amador Balbona, Antonio Torres Valle y Niurka González Rodríguez

### Licencia creative commons

	<p>Este artículo de la <a href="#">Revista Cubana de Salud y Trabajo</a> está bajo una licencia <a href="#">Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)</a>. Esta licencia permite el uso, distribución y reproducción del artículo en cualquier medio o formato, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente al autor del artículo y al medio en que se publica, en este caso <a href="#">Revista Cubana de Salud y Trabajo</a>.</p>
---	---