

Análisis probabilístico de seguridad para laboratorio secundario de calibración dosimétrica

Probabilistic safety assessment for a secondary standard dosimetry laboratory

Juan Guillermo Ramírez¹, Andrea Sánchez Galindo¹, José Esaú Garavito¹, María Esperanza Castellanos²

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 4, 55-64, 2020

Recibido: 3 de febrero de 2020

Aceptado: 27 de junio de 2020

Publicado en línea: 1 de septiembre de 2020

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.549>



© Ramírez, J. G., Sánchez Galindo, A., Garavito, J. E., Castellanos, M. E. 2020. Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: J. G. Ramírez, A. Sánchez, J. E. Garavito y M. E. Castellanos, “Análisis probabilístico de seguridad para laboratorio secundario de calibración dosimétrica”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 4, pp. 55-64, 2020. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.549>

Resumen

Se aplicó la metodología *análisis probabilístico de seguridad* para la cuantificación del riesgo radiológico asociado a la operación del irradiador del fabricante HopeWell modelo G-100 en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano. El irradiador cuenta con una fuente radiactiva de ⁶⁰Co con actividad nominal de 185 TBq, considerada una fuente extremadamente peligrosa para las personas, según el Organismo Internacional de Energía Atómica. El análisis contempló la identificación de los sucesos iniciadores mediante la metodología de diagramas lógicos maestros, la determinación de las secuencias accidentales y su frecuencia mediante árboles de fallo y la estimación de la magnitud de la consecuencia de cada secuencia accidental en función de la probabilidad de causar la muerte de un individuo asociada al escenario de exposición planteado. El riesgo cuantificado fue de $1,6 \times 10^{-5}$ por año para una exposición mortal, que es inferior a la restricción establecida de $1,44 \times 10^{-4}$ por año. Finalmente, se encontró que las disposiciones de protección y seguridad más críticas son las relacionadas con la capacitación sobre el significado de las señales de advertencia del inicio de las secuencias de último hombre afuera (LMO, por su sigla en inglés) y de inicio de irradiación, seguidas por estas señales de advertencia. **Palabras clave:** Evaluación de seguridad, riesgo radiológico, laboratorio secundario de calibración dosimétrica, árbol de fallas, diagrama lógico maestro, secuencia accidental.

¹ Servicio Geológico Colombiano

² Pontificia Universidad Javeriana

Email de correspondencia: jgramirez@sgc.gov.co

Abstract

A probabilistic safety analysis methodology was applied to quantify radiological risk associated with operation of the HopeWell model G-100 irradiator in the Secondary Standard Dosimetry Laboratory of the Servicio Geológico Colombiano. The irradiator had a ^{60}Co radioactive source with nominal activity of 185 TBq; the International Atomic Energy Agency regards this source as extremely dangerous to humans. The analysis considered initiating event identification using master logical diagrams; accidental sequences and their frequencies were determined via fault trees, and the magnitude of the consequence of each accidental sequence was estimated based on the probability of causing the death of an individual associated with the proposed exposure scenario. The quantified risk was 1.6×10^{-5} per year for mortal exposure, which is below the established restriction of 1.44×10^{-4} per year for mortal exposure. Finally, it was found that the most critical security and safety dispositions are those related to training about the meaning of the warning signals at the beginning of the last man outside (LMO) sequences and the beginning of irradiation, followed by those related to warning signs.

Keywords: SDL, PSA, radiological risk, safety assessment, radiation protection

1. Introducción

Actualmente en Colombia no se presta el servicio de calibración para cámaras de ionización utilizadas en actividades de control de calidad de equipos de radioterapia externa, por lo que, el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano, en el 2020 cubrirá esta necesidad mediante la puesta en operación en un irradiator modelo G-100 del fabricante HopeWell. Este irradiator alberga una fuente radiactiva de ^{60}Co , con actividad de 185 TBq, categorizada como una fuente *extremadamente peligrosa para las personas*: “si no es manejada en condiciones de seguridad tecnológica o no se protege con seguridad, desde el punto de vista físico, probablemente causaría lesiones permanentes a la persona que la manipulase o que estuviese en contacto con ella durante más de unos pocos minutos” [1].

El Gobierno nacional, por medio del Ministerio de Minas y Energía, ha emitido una normativa en la que adoptan reglamentos técnicos y procedimientos con el fin de establecer requisitos a las personas jurídicas o naturales que usen materiales radiactivos, para que estos sean empleados de forma segura. Entre estos se destacan la Resolución 181434 de 2002, “por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica” y la Resolución 90874 de 2014, “Por

medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas”.

La Resolución 90874 de 2014 establece por primera vez como requisito, para la obtención de la autorización de empleo de materiales radiactivos, la realización de una evaluación de seguridad, que consiste en el análisis de la eficacia de las disposiciones en materia de protección y seguridad radiológica para lograr el cumplimiento de los objetivos de protección radiológica, lo que ha representado un desafío para las personas naturales o jurídicas interesadas en el uso de materiales radiactivos.

En la actualidad, la mayoría de los solicitantes de autorización han empleado métodos cualitativos o semicuantitativos para realizar las evaluaciones de seguridad de sus instalaciones. En este trabajo se realiza una aproximación cuantitativa mediante la metodología de análisis probabilístico de seguridad, inicialmente utilizada para la evaluación del riesgo en reactores nucleares, y posteriormente aplicado por diferentes sectores, como el aeronáutico y el petroquímico.

El análisis de la seguridad “consiste en un conjunto de distintos análisis cuantitativos a fin de evaluar y valorar los desafíos para la seguridad en diversos estados operacionales, incidentes operacionales previstos y condiciones

de accidente, mediante métodos deterministas y también probabilistas” [1]. En consecuencia, en el presente trabajo se analizan las exposiciones potenciales, postulando posibles escenarios no planificados de exposición, teniendo en cuenta las características del equipo, de las instalaciones en donde será operado y las condiciones de operación, tras lo cual se analizan las secuencias de eventos que deben ocurrir para que tengan lugar, y se finaliza con una evaluación de las disposiciones en materia de protección y seguridad radiológica que permite establecer si son suficientes para contar con un balance apropiado entre la frecuencia de ocurrencia de los escenarios de exposición y las consecuencias que pueden ocasionar.

El presente trabajo se limita al riesgo de irradiación externa. Esto quiere decir que los escenarios postulados suponen que el material radiactivo se mantiene en el interior de la cápsula que lo contiene. Adicionalmente, el análisis se realiza con base en consideraciones conservativas para estimar la frecuencia de ocurrencia de los eventos, por lo que no se incluye un análisis de las incertidumbres del valor de riesgo.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del trabajo fue necesario recopilar información referente al diseño de la instalación, diseño del equipo, blindajes, situaciones operativas, disposiciones de protección y seguridad (enclavamientos, alarmas, procedimientos

y demás medidas del programa de protección radiológica y seguridad física de la instalación), tiempos de operación, entre otras particularidades de la práctica. Esta información fue obtenida mediante consulta de los documentos vigentes de la instalación, la *Memoria descriptiva de la instalación*, el *Manual de protección radiológica* y el *Manual del usuario* suministrado por el fabricante del equipo irradiador, visitas guiadas a la instalación y entrevistas con el responsable de la instalación y el personal operativo.

Una vez recopilada la información, se abordó el problema en tres fases:

1. Identificación de sucesos iniciadores
2. Determinación de secuencias accidentales
3. Valoración del riesgo y análisis

2.1. Identificación de sucesos iniciadores

Se postularon los posibles escenarios de exposición potencial según el lugar en donde se encuentra la persona que podría estar expuesta. Posteriormente se identificaron los sucesos iniciadores de forma deductiva, es decir, hacia el pasado, partiendo de los escenarios de exposición potencial postulados y de los eventos intermedios que deben ocurrir para que estos se presenten. En el contexto de análisis de seguridad, un evento es cualquier error humano (desviación de los procedimientos), falla de equipos o suceso externo que pueda contribuir a la ocurrencia de un escenario de exposición potencial [1]. Un suceso iniciador es un evento que

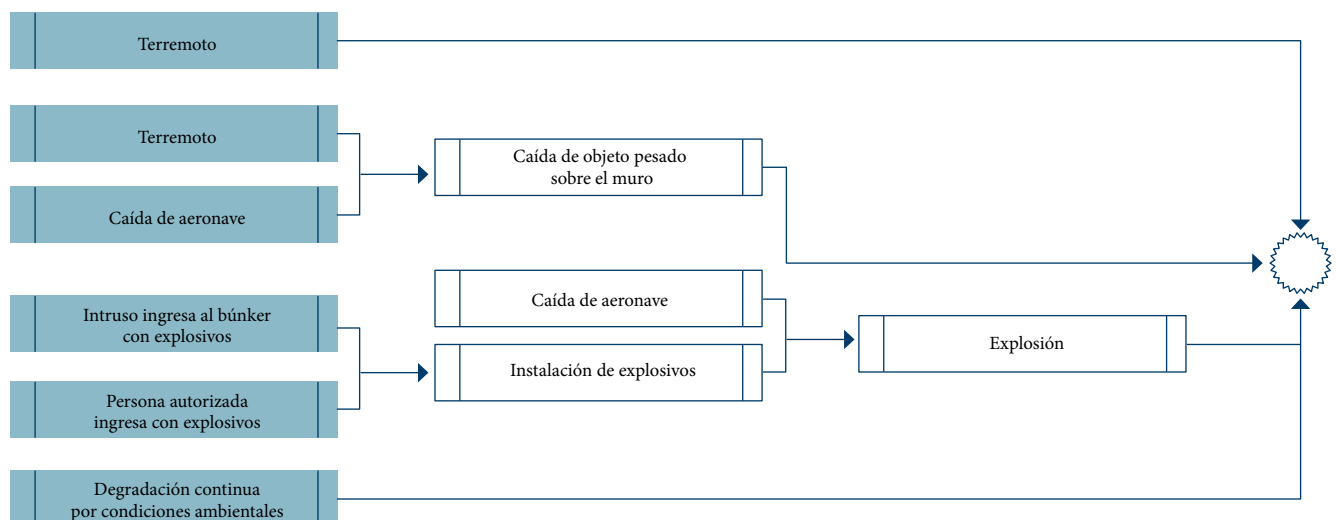


Figura 1. MLD para el escenario de falla de los blindajes estructurales







puede conducir a una exposición potencial o no planificada, si fallan las medidas previstas para prevenirla. Para esto se utilizó la metodología de diagrama lógico maestro (MLD), que, además de identificar los sucesos iniciadores, permite establecer un punto de partida para la construcción de los árboles de fallas necesarios para fase 2.

El MLD es un diagrama lógico similar a un árbol de fallas, pero sin cálculos asociados. Este diagrama puede representar los efectos de una falla en un sistema y ha sido utilizado en la identificación de sucesos iniciadores en plantas de generación de energía nuclear [2]. En la figura 1, a modo de ejemplo se muestra el MLD para un escenario de falla de blindajes estructurales.

2.2. Determinación de secuencias accidentales

El análisis partió de los sucesos iniciadores determinados en la fase anterior y prosiguió con la elaboración del árbol de fallas para cada uno de los escenarios de exposición. El árbol de fallas es una metodología de diagramas con compuertas lógicas que permite esquematizar el progreso de la secuencia accidental. La notación empleada en la construcción de los diagramas se muestra en la figura 2.

Figura 2. Notación de los árboles de fallas

	Suceso básico. Es un suceso que no requiere posterior desarrollo
	Suceso no desarrollado. Suceso que no se desarrolla debido a que sus consecuencias son despreciables o no hay información suficiente
	Suceso intermedio. Es un suceso de fallo que ocurre porque una o más causas anteriores ocurren a través de unas puertas lógicas.
	Puerta Y. El suceso de fallo a la salida solo ocurre si todas las entradas ocurren
	Puerta O. El suceso de fallo a la salida ocurre si alguna de las entradas ocurre
	Transferencia. Indica que el árbol continúa en la compuerta denotada

Las secuencias accidentales se definen como el conjunto mínimo de sucesos básicos con los que se produce el fallo del sistema. En el contexto de árboles de fallas, estos también son denominados *conjuntos mínimos de corte*. Con el fin de representar la forma de determinar los conjuntos mínimos de corte, en la figura 3 se expone un árbol de fallas en el que se resalta uno de los posibles conjuntos mínimos de corte.

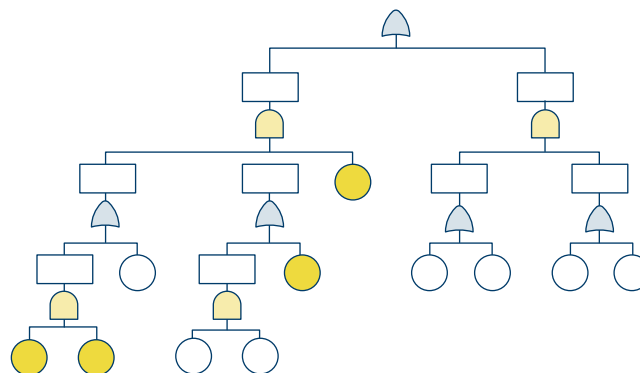


Figura 3. Árbol de fallas con identificación de camino mínimo

La frecuencia de ocurrencia de cada secuencia accidental es determinada mediante la ecuación 1:

$$f_i = \prod q_j \tag{1}$$

Donde q_j es la probabilidad de fallo por año o frecuencia de ocurrencia de los sucesos básicos.

En la estimación de la frecuencia de cada evento, ya sea frecuencia de falla o de ocurrencia del suceso externo, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- » La frecuencia de falla de los elementos electromecánicos es tomada como 0,04 fallos por año, debido a que el fabricante manifiesta que cada componente del irradiador o del sistema de seguridad tiene una vida útil igual o mayor que la vida útil recomendada para el irradiador, que es de veinticinco años. La probabilidad es determinada usando el primer término de la distribución de Poisson:

$$P = 1 - e^{-\rho t} \tag{2}$$

Donde:

ρ es la tasa de fallos por año.

t es el periodo de tiempo estudiado, que para este caso es de un año.

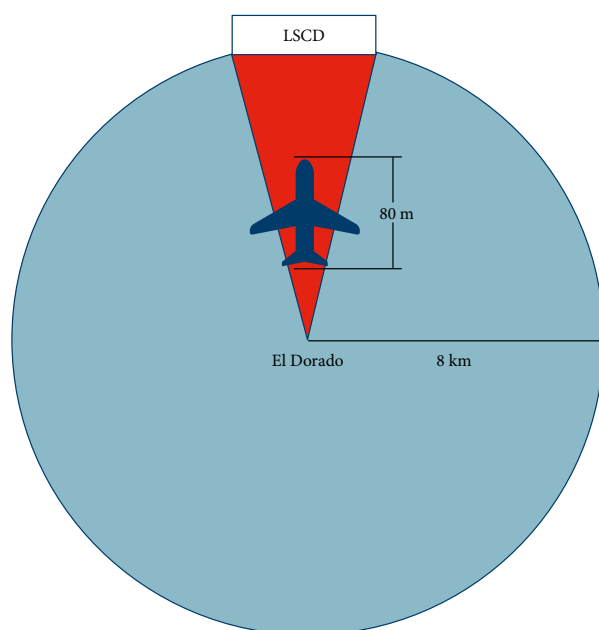
- » La frecuencia de la falla de procedimientos, debida a errores humanos, está dada por el producto entre el número de veces que es ejecutado el procedimiento y la probabilidad de error humano. Se toma como un valor de 6×10^{-3} , considerando un error de comisión con características de la tarea compleja y bajo estrés [3].
- » La frecuencia de ocurrencia de un terremoto, según el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia,

corresponde a 1×10^{-3} eventos al año con magnitud superior a 6,5 en la escala de Richter, magnitud a partir de la cual, se supone, pueden tener las consecuencias postuladas.

- » La probabilidad de que personal con autorización de acceso cometa un acto terrorista se estima considerando que dicho evento no ha ocurrido en los últimos cien años. Por tanto, se estima en 1×10^{-2} por año.
- » Para determinar la probabilidad de que un avión caiga sobre el LSCD-SGC se tuvo en cuenta que en Bogotá ocurren 7,16 accidentes al año, según la información reportada por la Aeronáutica Civil. Asumiendo que todos los accidentes reportados ocurren en el interior de un círculo con radio igual a la distancia entre la instalación y el aeropuerto, distancia de 8 km, aproximadamente, la probabilidad de que suceda un accidente en la línea que une el centro del aeropuerto con la instalación se aproxima a la relación entre el área del segmento circular que limita los extremos del Laboratorio y el centro del círculo con el área de todo el círculo. Por tanto, la probabilidad, considerando la caída del avión más grande que transita sobre Bogotá, puede estimarse así:

$$f = 7,16 \frac{\text{accidentes}}{\text{año}} \cdot \frac{S}{\pi r^2} \cdot \frac{80 \text{ m}}{8000 \text{ m}} = 5,67 \times 10^{-6} \frac{\text{accidentes}}{\text{año}}$$

Figura 4. Consideraciones geométricas para calcular la frecuencia de accidentes aéreos



- » La probabilidad de que la fuente esté expuesta se determina considerando que la fuente esté en posición de irradiación el 50 % del tiempo de la jornada laboral. Por tanto, se estima en $1,67 \times 10^{-1}$ por año.

2.3. Valoración del riesgo y análisis

El riesgo se determina mediante la ecuación 3:

$$R = \sum_i f_i \cdot C_i \quad (3)$$

Donde i representa cada secuencia accidental que produce un escenario de exposición.

La magnitud de las consecuencias se determinó en función de la dosis absorbida que experimentaría la persona expuesta (D), calculada mediante la ecuación 4:

$$D = \frac{r \cdot t \cdot F}{d^2} \quad (4)$$

Donde:

D es la dosis equivalente en el punto en donde se encuentra ubicada la persona de interés (mSv)

r es la tasa de dosis a un metro de la fuente sin la acción de los blindajes (mSv/h · m²)

d es la distancia entre la fuente y la persona de interés (m)

t es el tiempo en que la persona se encuentra sometida al escenario durante el año (h)

F es el factor de transmisión del blindaje interpuesto

La exposición a radiación ionizante puede ocasionar efectos estocásticos o determinísticos, cuya aparición depende de varios factores, entre ellos la dosis, la tasa de dosis, el tipo de radiación, el órgano irradiado, el sexo, la raza y la edad. Entre los efectos determinísticos que ocurren por la muerte de un gran número de células se encuentra una gran variedad de síntomas y efectos que van desde náusea, fatiga y cambios en la sangre hasta la destrucción del sistema gastrointestinal y la muerte de la persona expuesta; de forma similar, los efectos estocásticos, que son debidos a la inducción de cambios genéticos en las células, tienen una gran variedad de manifestaciones.

La gravedad de las consecuencias de los efectos determinísticos depende en gran medida de la dosis y del órgano expuesto; en cambio, en los efectos estocásticos, las consecuencias no dependen de la dosis. Por ello, para tratar los tipos de

efectos de forma indiscriminada en el contexto de este trabajo, la probabilidad de que una dosis dada cause la muerte (C) será utilizada para valorar las consecuencias, considerando dosis uniformemente distribuidas en el cuerpo.

La Agencia Internacional de Energía Atómica [4] analiza los efectos determinísticos sobre el sistema nervioso central y establece valores de dosis letales, que son presentados en la tabla 1.

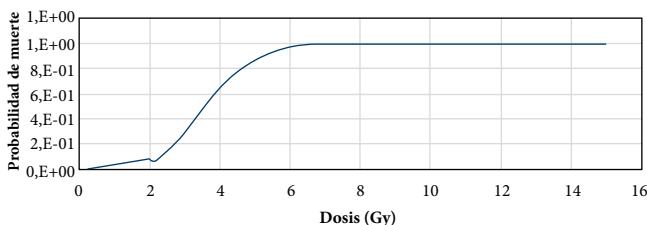
Tabla 1. Valores de dosis letales

Identificación	Descripción	Valor (Gy)
$LD_{\frac{5}{60}}$	Dosis letal para el 5% de las personas expuestas en los 60 días posteriores	2
$LD_{\frac{50}{60}}$	Dosis letal para el 50% de las personas expuestas en los 60 días posteriores	3,5
$LD_{\frac{100}{60}}$	Dosis letal para el 100% de las personas expuestas en los 60 días posteriores	15

Para determinar la consecuencia en función de la dosis se propuso una función que cumpliera con las condiciones de los valores de dosis letal citados en la tabla 1, y el modelo lineal sin umbral para el riesgo de cáncer mortal, cuya pendiente es de 4×10^{-2} por cada Sv. La función fue desarrollada a partir de un modelo lineal cuadrático usado en los modelos de supervivencia celular en radiobiología. La función desarrollada es la ecuación 5, y su comportamiento se presenta en el figura 5.

$$D = \begin{cases} \text{Si } D < 2 \text{ Gy}; & 0,04 \cdot D \\ \text{Si } D \geq 2 \text{ Gy}; & (1 - e^{0,1595D - 0,1422D^2})^2 \end{cases} \quad (5)$$

Figura 5. Probabilidad de muerte debida a la dosis



Aceptabilidad del riesgo

Calculados los valores de consecuencia de los diferentes escenarios de exposición y de la probabilidad de ocurrencia de las secuencias accidentales que los causan, es posible obtener el valor de riesgo de la instalación mediante la ecuación 6. La principal utilidad del APS es verificar que la instalación tiene un riesgo inferior al valor de restricción de riesgo estable-

cido. La Comisión Internacional de Protección Radiológica [3] recomienda una restricción de riesgo de las exposiciones potenciales, que debe ser similar al riesgo de las exposiciones normales. Por lo tanto, para el alcance de este trabajo se considera aceptable un riesgo (R_A) de cáncer mortal por una dosis de 3,6 mSv, que corresponde a la máxima dosis que recibiría un operador del laboratorio por exposiciones normales, y que se determina usando la ecuación 3, como sigue:

$$R_A = 4 \times 10^{-2} \cdot \frac{1}{Sv} \cdot 3,6 \times 10^{-3} \frac{Sv}{año} = 1,44 \times 10^{-4} \frac{1}{año}$$

Medida de importancia según Fussell-Veseley (FV)

La medida FV “es útil para seleccionar los elementos (modos de fallo) que potencialmente tienen mayor contribución en el riesgo total” [5]. Es la medida de importancia de una falla x definida como la relación entre la suma de las probabilidades de las secuencias de los conjuntos mínimos de fallos CM_i , en la que participa dicha falla y la suma de las probabilidades de todas las secuencias Q (probabilidad total de ocurrencia de una exposición potencial).

$$FV_x = \frac{\sum_{x \in CM_i} P(CM_i)}{Q} \quad (6)$$

Puede tomar valores entre 0 y 1, representa la probabilidad de que haya intervenido el elemento analizado en un accidente dado. Se valoró dicha medida con el fin de conocer cuáles son las disposiciones más importantes. Sobre estas se debería intervenir si fuese necesario reducir la probabilidad de ocurrencia de una exposición potencial.

Medida de incremento del riesgo

Esta medida (RAW, por su sigla en inglés) es la diferencia entre el riesgo, si la probabilidad de fallo de una determinada barrera es 1, es decir, si la barrera está averiada o no funciona, y el riesgo real del sistema. Esta medida da información de la sensibilidad del riesgo a la falla del componente [6].

Medida de reducción de riesgo

Esta medida (RRW, por su sigla en inglés) es la relación entre el riesgo total si el componente nunca falla, es decir, la probabilidad de fallo es 0, y el riesgo real del sistema. Esta medida brinda información referente a la contribución del componente a la confiabilidad del sistema [6].

3. Resultados y discusión

Los escenarios de exposición postulados se describen en la figura 6.

Los sucesos iniciadores identificados se muestran en la tabla 2.

A partir de los diagramas lógicos maestros se construyó el árbol general de fallas, que se muestra en la figura 7.

Figura 6. Escenarios de exposición potencial

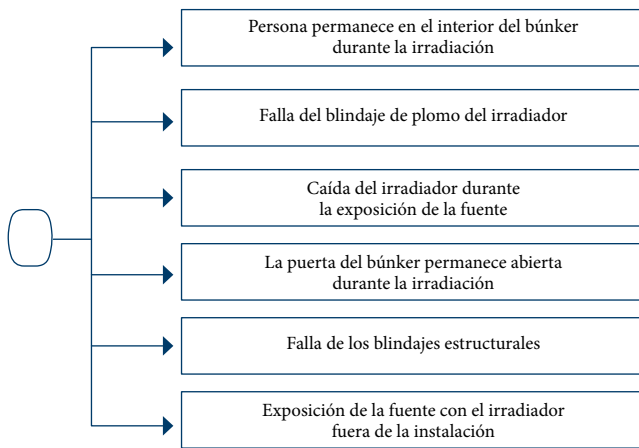
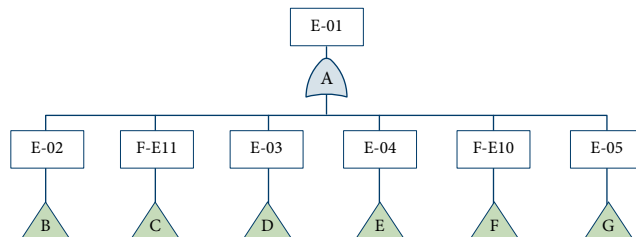


Tabla 2. Listado de sucesos iniciadores

Descripción
Terremoto
Caída de una aeronave
Intención o coacción para cometer un acto terrorista por personal con autorización de acceso
Degradación continua de la estructura por condiciones ambientales
Inicio de irradiación con persona en el interior del búnker
La puerta del búnker no se cierra antes de iniciar la irradiación
Hurto del irradiador

Figura 7. Árbol general de fallas



En la figura se muestra como evento tope una “exposición potencial”, representada como E-01, que puede deberse a uno o más de los escenarios de exposición potencial identificados. Una vez identificadas las disposiciones de protección y seguridad, se desarrolla el árbol de fallos, que

corresponde a cada uno de los escenarios de exposición, o cabeceros (B, C, D, E, F y G) en el diagrama. Su definición se muestra en la tabla 3.

La notación utilizada en la elaboración de los árboles de fallos se muestra en la tabla 4.

Para la construcción de los árboles de falla, además de eventos asociados a la falla de las diferentes disposiciones de protección y seguridad, se consideró la ocurrencia de sucesos externos. En la construcción de los árboles de falla, estos sucesos son tipificados como *eventos base*. Los sucesos externos fueron identificados a partir de los MLD construidos en la sección anterior, y se listan en la tabla 5.

La condición de fuente expuesta se tuvo en cuenta en el análisis como un evento externo, pues corresponde a una condición necesaria para que se presenten exposiciones potenciales en determinadas secuencias accidentales.

En la figura 8 se muestra, a modo de ejemplo, el árbol de fallas para el escenario “La persona permanece en el interior del búnker durante la irradiación”.

Tabla 3. Identificación de los escenarios de exposición

ID	Cabecero	Escenario de exposición
E-02	B	La persona permanece en el interior del búnker durante la irradiación
F-E11	C	Falla el blindaje de plomo del irradiador
E-03	D	Caída del irradiador durante la exposición de la fuente
E-04	E	La puerta del búnker permanece abierta durante la irradiación
F-E10	F	Fallan los blindajes estructurales del búnker
E-05	G	Exposición de la fuente con el irradiador fuera de la instalación

Tabla 4. Notación de barreras y eventos

Tipo de elemento	Convención
Evento o suceso	E-XX
Enclavamiento	EXX
Alarma	AXX
Procedimiento	PXX
Falla de enclavamiento	F-E-XX
Falla de la alarma	F-A-XX
Falla de procedimiento	F-P-XX

Tabla 5. Eventos externos

ID evento	Descripción
E-15	Terremoto
E-16	Caída de una aeronave
E-20	Intención o coacción para cometer un acto terrorista por personal con autorización de acceso
E-21	Fuente expuesta
E-27	Degradación continua de la estructura por condiciones ambientales

Construidos los árboles de falla, se identificaron veintiocho conjuntos mínimos de fallos, o secuencias accidentales, y se determinó su frecuencia de ocurrencia a partir de la ecuación 1. La frecuencia de cada suceso es la sumatoria de las frecuencias de los conjuntos mínimos de fallos o secuencias accidentales. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Para estimar la magnitud de las consecuencias se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- » El factor de transmisión usado para el escenario de caída del irradiador es tomado del factor de transmisión del muro más delgado reportado en la *Memoria descriptiva de la instalación*.
- » El tiempo de exposición considerado corresponde al tiempo estimado de detección del escenario, por lo que no son tenidas en cuenta las contribuciones de dosis debidas a la atención de la emergencia.
- » Las tasas de dosis se determinan despreciando el efecto del decaimiento de la fuente, es decir, la correspondiente a la actividad nominal de 185 TBq.

En la tabla 7 se muestra el resultado de la estimación de dosis y su correspondiente valor de consecuencia, determinado a partir de la ecuación 5.

En la tabla 8 se resumen los valores utilizados para la estimación del riesgo R.

Figura 8. Árbol de fallas correspondiente al escenario E-02

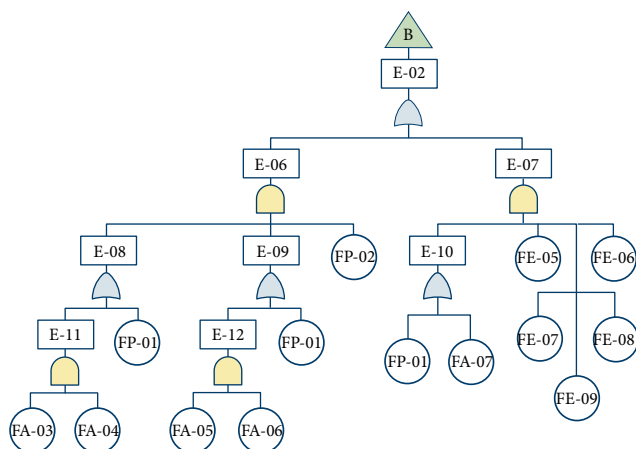


Tabla 6. Frecuencia de los escenarios de exposición

Cabezote	Escenario	Probabilidad de ocurrencia por año
B	E-02	8,64E-06
C	F-E11	1,04E-04
D	E-03	3,02E-04
E	E-04	5,37E-06
F	E-36	1,40E-06
G	E-05	8,32E-11

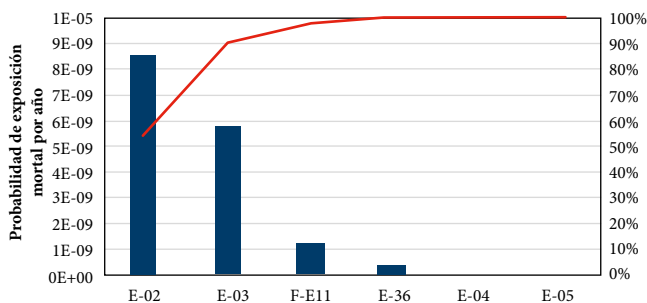
Tabla 7. Valores de consecuencia por escenario de exposición

ID	Escenario de exposición	Dosis (Gy)	Consecuencia
E-02	La persona permanece en el interior del búnker durante la irradiación	7,2	$9,96 \times 10^{-1}$
F-E11	Falla el blindaje de plomo del irradiador	0,29	$1,15 \times 10^{-2}$
E-03	Caída del irradiador durante la exposición de la fuente	0,48	$1,94 \times 10^{-2}$
E-04	La puerta del búnker permanece abierta durante la irradiación	8×10^{-4}	$3,2 \times 10^{-5}$
E-36	Fallan los blindajes estructurales del búnker	2,84	$2,65 \times 10^{-1}$
E-05	Exposición de la fuente con el irradiador fuera de la instalación	288,4	1,00

Tabla 8. Estimación del riesgo

Cabezote	Escenario	Consecuencia (probabilidad de muerte por evento)	Frecuencia (probabilidad de ocurrencia por año)	Riesgo (probabilidad de muerte por año)
B	E-02	$9,96 \times 10^{-1}$	$8,64 \times 10^{-6}$	$8,61 \times 10^{-6}$
C	F-E11	$1,15 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-6}$
D	E-03	$1,94 \times 10^{-2}$	$3,02 \times 10^{-4}$	$5,86 \times 10^{-6}$
E	E-04	$3,20 \times 10^{-5}$	$5,37 \times 10^{-6}$	$1,72 \times 10^{-10}$
F	E-36	$2,65 \times 10^{-1}$	$1,40 \times 10^{-6}$	$3,71 \times 10^{-7}$
G	E-05	1,00	$8,32 \times 10^{-11}$	$8,32 \times 10^{-11}$
Riesgo total				$1,6 \times 10^{-5}$

Figura 9. Distribución del riesgo



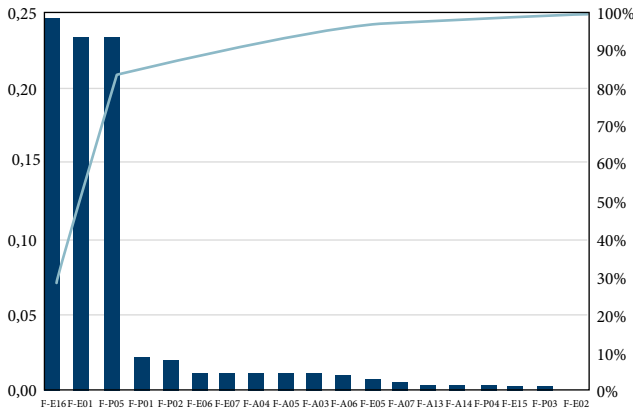
Análisis de la importancia según Fussell-Vesely

Se realizó el análisis de importancia según Fussell-Vesely, en el cual se puede apreciar que siete de las veintitrés disposiciones de protección y seguridad son las más relevantes, de acuerdo con el diagrama de Pareto. El resultado se muestra en la figura 10.

Tabla 9. Fallas más importantes para determinar la probabilidad de ocurrencia de una exposición potencial

ID de la falla	Descripción	Importancia
F-E16	Falla el diseño robusto del irradiador	$9,96 \times 10^{-1}$
F-E01	Falla el control de acceso de la entrada principal de la sede	$1,15 \times 10^{-2}$
F-P05	Falla el procedimiento de verificación de paquetes en la portería	$1,94 \times 10^{-2}$

Figura 10. Importancia de las barreras



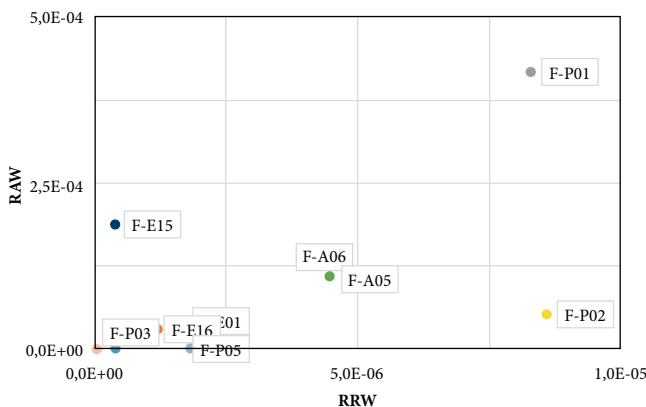
Medidas de reducción e incremento de riesgo

Se obtuvieron los valores de RRW y RAW y fueron graficados con el fin de identificar los sucesos básicos más críticos. En la figura 11 se pueden apreciar los valores críticos, que corresponden a aquellos ubicados en el cuadrante superior derecho y debiesen ser los primeros en ser considerados en procesos de rediseño que busquen disminuir la probabilidad de fallo del sistema.

Tabla 10. Descripción de las barreras más importantes.

ID del evento	Descripción
F-P01	Falla la divulgación de señales de advertencia
F-P02	Falla el procedimiento LMO (<i>last man out</i>)
F-A05	Falla la señal visual del inicio de la secuencia de irradiación
F-A04	Falla la señal audible del inicio de la secuencia LMO
F-A03	Falla la señal visual del inicio de la secuencia LMO
F-A06	Falla la señal audible del inicio de la secuencia de irradiación
F-A02	Falla el sistema de alarma contra accesos no autorizados en periodos de no operación
F-A01	Falla el sistema cerrado de televisión vigilado por personal de la empresa de seguridad

Figura 11. Medida de incremento vs. medida de reducción de riesgo



Nota. En algunos puntos coinciden varias barreras. En el punto denotado F-A06 coinciden también F-A05, F-A04 y F-A03.

4. Conclusiones

Se determinó el riesgo radiológico con un valor de $1,6 \times 10^{-5}$ de exposición mortal por año, inferior a la restricción de riesgo establecida, de $1,44 \times 10^{-4}$.

Las fallas críticas resultaron relacionadas con las señales que advierten el inicio de las secuencias LMO y de irradiación, así como con la capacitación y el entrenamiento necesarios para su interpretación. Por lo anterior, es necesario que se promuevan actividades de divulgación de la importancia de comprender el significado de las señales y la pronta notificación de fallo.

El escenario de exposición con mayor contribución al riesgo total es la permanencia de una persona en el interior del búnker, por lo que es conveniente realizar actividades tendientes a la sensibilización del personal ocupacionalmente expuesto a este escenario.

El valor de RAW para la falla del procedimiento de divulgación de señales de advertencia F-P01 y para la falla de control de acceso en la entrada principal de la sede F-E15 refleja que en su ausencia se supera el valor de aceptabilidad del riesgo, por lo que se debe mantener cuidadosamente su fiabilidad. Sin embargo, antes de considerar una mejora en el sistema es necesario revisar la construcción de los árboles de fallo en donde interviene, así como refinar el cálculo del valor de la probabilidad de fallo con el uso de modelos de fiabilidad humana y análisis de fallas de causa común.

Dada la importancia observada en las fallas de los controles de acceso, es importante considerar, en la actualización de este análisis, otras posibles rutas de accesos no autorizados.

La metodología puede ser tan precisa como se quiera, y la fiabilidad de los resultados depende de la rigurosidad de su implementación, por lo que es muy importante, antes de utilizar los resultados del análisis para la toma de decisiones, realizar un desarrollo más detallado de los principales contribuyentes, una revisión cuidadosa y preferiblemente una validación independiente.

La metodología ha mostrado ser útil en una primera identificación de vulnerabilidades del sistema de protección y seguridad radiológica, permite focalizarse fácilmente en las disposiciones más críticas, escenarios que hacen un mayor aporte al riesgo global de la instalación, y permite analizar el impacto que sobre el riesgo tienen las modificaciones en el sistema de protección radiológica o la realización de la práctica.

Debido a que el riesgo global corresponde a la suma del riesgo de cada secuencia accidental, es posible incluir de forma sencilla escenarios de exposición adicionales, así como nuevas disposiciones de protección radiológica, lo que permitirá conocer su impacto en el riesgo.

Referencias

- [1] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Clasificación de las fuentes radiactivas: Guía de seguridad RS-G-1.9*, Viena: OIEA, 2009.
- [2] J. Purba, "Master Logic Diagram: An approach to identify initiating events of HTGRs", *Journal of Physics*, vol. 962, conference series n.º 012036, pp. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012036>
- [3] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia IAEA-TECDOC-1685/S*, Viena: OIEA, 2012.
- [4] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Practical radiation technical manual, health effects and medical surveillance*, Viena: OIEA, 2004.
- [5] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Análisis probabilístico de seguridad de tratamientos de radioterapia con acelerador lineal, IAEA-TECDOC-1670/S*, Viena: OIEA, 2012.
- [6] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants - Specific safety guide SSG-3*, Viena: OIEA, 2010.
- [7] Comisión Internacional de Protección Radiológica, *ICRP publicación 103L: Las recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Madrid: Senda Editorial, 2007.