



# GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD RADIOLÓGICA DE LAS INSTALACIONES Y ACTIVIDADES

---

REQUISITO REGLAMENTARIO

DEPARTAMENTO DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ENERGÍA | 24 CALLE 21-12 ZONA 12, GUATEMALA, GUATEMALA

# GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD RADIOLÓGICA DE LAS INSTALACIONES Y ACTIVIDADES

## CONTENIDO

	Página
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>1. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>4</b>
1.1. FUENTES Y/O MATERIAL RADIATIVO .....	4
1.2. Estimación de las dosis esperadas en condiciones normales de operación tanto para los trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.....	5
1.3. Estimación de las dosis potenciales para casos de situaciones de emergencia, accidentes o sucesos radiológicos. ....	6
1.4. Identificación de los sucesos iniciadores de accidentes. ....	7
1.5. Estimación de la frecuencia (f) de ocurrencia de dichos sucesos.....	8
1.6. Análisis de la magnitud de las consecuencias (C) asociadas a cada suceso iniciador.....	9
1.6.1. Consecuencias para los trabajadores y público .....	10
1.6.2. Consecuencias para los pacientes.....	10
<b>2. ANÁLISIS DE LAS DEFENSAS (P) EN PROFUNDIDAD: BARRERAS Y REDUCTORES.....</b>	<b>11</b>
<b>3. FORMA DE COMBINAR LAS VARIABLES .....</b>	<b>12</b>
<b>4. EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL RIESGO ASOCIADO A CADA SECUENCIA ACCIDENTAL. ....</b>	<b>13</b>
<b>5. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ACEPTABILIDAD DEL RIESGO. ....</b>	<b>13</b>
<b>6. GESTIÓN Y REDUCCIÓN DEL RIESGO .....</b>	<b>14</b>
<b>7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>17</b>
<b>9. ANEXOS: EJEMPLOS DE APLICACIÓN POR PRÁCTICA .....</b>	<b>18</b>
<b>9.1. ANEXO 1: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA DE DOSIS .....</b>	<b>18</b>
<b>9.2. ANEXO 2: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON BRAQUITERAPIA DE BAJA TASA DE DOSIS .....</b>	<b>26</b>
<b>9.3. ANEXO 3: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON IRRADIADORES INDUSTRIALES.....</b>	<b>34</b>
<b>9.4. ANEXO 4: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON RADIOTERAPIA DE HACES EXTERNOS CON COBALTO 60 .....</b>	<b>41</b>

<b>9.5. ANEXO 5: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES INDUSTRIALES RELACIONADAS CON FUENTES GAMMA .....</b>	<b>52</b>
<b>9.6. ANEXO 6: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON PERFILAJE DE POZOS .....</b>	<b>58</b>
<b>9.7. ANEXO 7: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON GAMMAGRAFÍA INDUSTRIAL MÓVIL.....</b>	<b>65</b>
<b>9.8. ANEXO 8: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON DIAGNOSTICO EN MEDICINA NUCLEAR .....</b>	<b>72</b>
<b>9.9. ANEXO 9: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON ACELERADORES LINEALES .....</b>	<b>80</b>
<b>9.10. ANEXO 10: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON RAYOS X MEDICOS.....</b>	<b>81</b>
<b>9.11. ANEXO 11: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON RAYOS X DENTALES PERIAPICALES .....</b>	<b>85</b>
<b>9.12. ANEXO 12: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON EQUIPO DE MAMOGRAFIA.....</b>	<b>89</b>
<b>9.13. ANEXO 13: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON DENSITOMETRIA OSEA .....</b>	<b>93</b>
<b>9.14. ANEXO 14: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS .....</b>	<b>97</b>
<b>9.15. ANEXO 15: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON ALMACENAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS .....</b>	<b>105</b>

## INTRODUCCIÓN

La presente guía pretende ilustrar como realizar una evaluación de riesgo en instalaciones y/o actividades que involucren equipos generadores de radiación y/o fuentes radiactivas.

### 1. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LA INSTALACIÓN

#### 1.1. FUENTES Y/O MATERIAL RADIATIVO

Para el caso de las prácticas que involucran el uso/manejo u operación de fuentes o material radiactivo, se procederá de la manera siguiente:

1. Se estima la dosis a la que estará expuesto el trabajador ocupacionalmente expuesto, con las condiciones de operación normales., utilizando la expresión siguiente:

$$D = \frac{A \Gamma}{d^2} \times t$$

Donde A = Actividad de la fuente o material radiactivo en las dimensionales adecuadas (Bq o Ci)

$\Gamma$  = Factor gamma del nucleído (véase Tabla 1)

$d^2$  = Distancia entre la fuente radiactiva y el punto de interés donde pueda estar ubicado el TOE, medida en metros (m)

$t$  = tiempo de exposición medido en horas (hr)

**TABLA A1 – FACTOR GAMMA DE RADIONUCLEIDOS COMUNES**

Nucleído	Factores Gamma - $\Gamma$		
	$\frac{mSv m^2}{GBq hr}$	$\frac{mSv m^2}{MBq hr}$	$\frac{mSv m^2}{mCi hr}$
Cs-137	---	$1.032 \times 10^{-4}$	$2.85 \times 10^{-3}$
Co-60	---	$3.703 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-2}$
Ir-192	---	$1.599 \times 10^{-4}$	$3.73 \times 10^{-3}$
I-131	---	$7.647 \times 10^{-5}$	$2.02 \times 10^{-3}$
Ra-226	---	$3.274 \times 10^{-6}$	---
Au-198	---	$7.880 \times 10^{-5}$	---
C-11	$1.393 \times 10^{-1}$	---	---
N-13	$1.394 \times 10^{-1}$	---	---
O-15	$1.395 \times 10^{-1}$	---	---
F-18	$1.351 \times 10^{-1}$	---	---
Co-57	$1.410 \times 10^{-2}$	---	---
Ga-67	$1.950 \times 10^{-2}$	---	---
Ga-68	$1.290 \times 10^{-1}$	---	---
Mo-99 / Tc-99m	$3.360 \times 10^{-2}$	---	---
Tc-99m	$1.410 \times 10^{-2}$	---	---
In-111	$8.310 \times 10^{-2}$	---	---
I-123	$3.610 \times 10^{-2}$	---	---
I-125	$3.770 \times 10^{-2}$	---	---
Xe-133	$1.430 \times 10^{-2}$	---	---
Cs-137 / Ba-137	$8.210 \times 10^{-2}$	---	---
Tl-201	$1.020 \times 10^{-2}$	---	---

La tabla A1 de factores gamma para radionucleidos comunes será utilizada para los distintos ejemplos en los Apéndices.

## 1.2. Estimación de las dosis esperadas en condiciones normales de operación tanto para los trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.

La estimación de dosis para los trabajadores debería realizarse teniendo en cuenta lo siguiente:

- a) Definir los cargos de los trabajadores expuestos que serán considerados en la estimación de dosis.
- b) Definir las tareas en las cuales estos trabajadores están expuestos.
- c) Definir las tasas de dosis que reciben los trabajadores durante la ejecución de cada una de las tareas anteriormente indicadas, en las condiciones en que se refleje un balance razonable entre los aspectos conservadores y realistas (ejemplo tareas donde se reciba mayor dosis y menor distancia, etc.)
- d) Definir los tiempos dedicados a cada tarea.
- e) Calcular las dosis durante la realización de cada una de las tareas como un producto de la tasa de dosis por el tiempo.
- f) Calcular la dosis total estimada que recibe el trabajador como la suma de la dosis recibida en cada una de las tareas definidas.
- g) Comparar la dosis total con las restricciones de dosis, cuando estas han sido definidas o con los límites establecidos en las regulaciones vigentes.

La estimación de dosis para el público debe realizarse teniendo en cuenta lo siguiente:

- a. Definir las áreas destinadas al público.
- b. Definir las tasas de dosis que recibe el público.
- c. Definir los tiempos de permanencia en las áreas de público.
- d. Calcular la dosis debido a la permanencia en estas áreas como un producto de la tasa de dosis por el tiempo.
- e. Comparar la dosis total con las restricciones de dosis, cuando estas han sido definidas o con los límites establecidos en las regulaciones vigentes.

Para medir los niveles de riesgo cuantitativamente, se utilizara la siguiente tabla utilizando como limite el valor de 20 mSv.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables

	0.5	Medio	Condiciones por mejorar
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo

### 1.3. Estimación de las dosis potenciales para casos de situaciones de emergencia, accidentes o sucesos radiológicos.

Estimación para los trabajadores.

La estimación de dosis debería realizarse según la secuencia siguiente:

- a) Definir los escenarios de potenciales accidentes considerando:
  - Lecciones aprendidas de accidentes que han ocurrido.
  - Resultados de los análisis de riesgo (secuencias accidentales de mayor riesgo). La selección de los escenarios debería reflejar un balance razonable entre los aspectos conservadores y realistas, para evitar que el número de escenarios analizados sea inmanejable en la práctica.
- b) Definir las tasas de dosis máximas que recibe el trabajador durante el accidente. En este paso se analizará cada escenario definido, de forma independiente.
- c) Definir los tiempos de permanencia del miembro del público durante el accidente.
- d) Calcular la dosis total estimada que recibe el miembro del público durante el accidente, como un producto de la tasa de dosis por el tiempo.
- e) Proponer medidas de protección, mitigación y respuesta.

Estimación para el público.

La estimación de dosis debería realizarse según la secuencia siguiente:

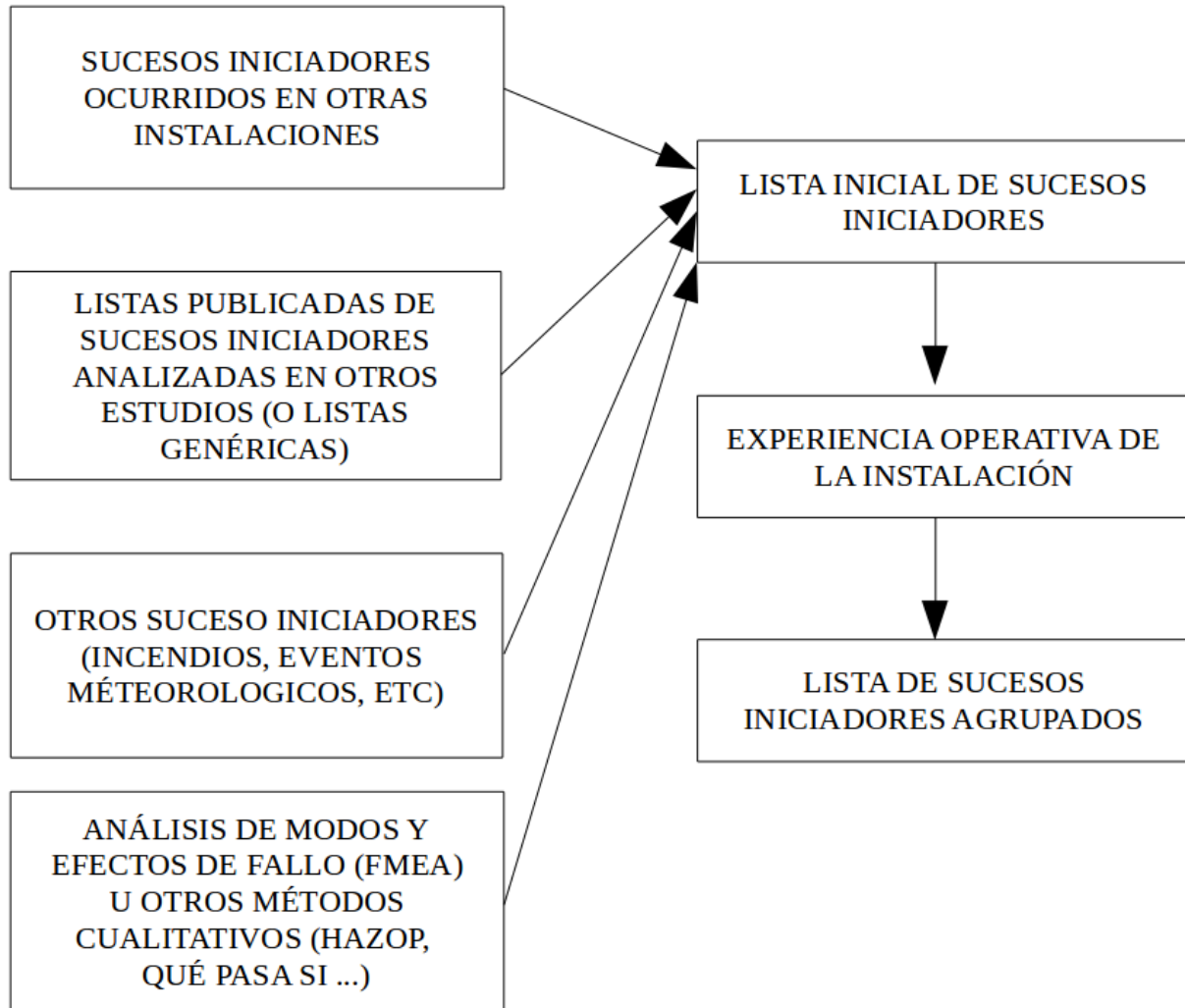
- a) Definir los escenarios de potenciales accidentes considerando:
  - Lecciones aprendidas de accidentes que han ocurrido.
  - Resultados de los análisis de riesgo (secuencias accidentales de mayor riesgo). La selección de los escenarios debería reflejar un balance razonable entre los aspectos conservadores y realistas, para evitar que el número de escenarios analizados sea inmanejable en la práctica.
- b) Definir las tasas de dosis máximas que recibe el miembro del público durante el accidente. En este paso se analizará cada escenario definido, de forma independiente.
- c) Definir los tiempos de permanencia del miembro del público durante el accidente.
- d) Calcular la dosis total estimada que recibe el miembro del público durante el accidente, como un producto de la tasa de dosis por el tiempo.

e) Proponer medidas de protección, mitigación y respuesta.

#### 1.4. Identificación de los sucesos iniciadores de accidentes.

Se identifican todos los fallos de equipo y errores humanos posibles en la práctica. Existen varios métodos para poder determinar los sucesos iniciadores: Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA), el Análisis de peligros y operatividad (HAZOP), así como el análisis “¿Qué pasaría si ...?”. También pueden utilizarse listados genéricos de sucesos iniciadores que hayan sido publicados y adaptarlo a las condiciones concretas de la práctica.

Figura 1 - Criterios para Obtener Sucesos Iniciaores



Criterios válidos para poder obtener los sucesos iniciadores para cada práctica.

Conocer cuáles son los sucesos iniciadores es muy importante porque si éste no ocurre, no puede ocurrir el accidente a pesar de que otras barreras pueden fallar.

### 1.5. Estimación de la frecuencia (f) de ocurrencia de dichos sucesos.

Se analiza la frecuencia con la que un suceso iniciador puede ocurrir en un determinado tiempo. Se considera importante tomar como base los registros de las fallas de equipos y errores humanos que existen en la instalación a evaluar. Para fallos de equipos se deberá considerar la tasa de fallo de sus componentes y las horas de operación. La frecuencia (f) de los sucesos iniciadores provocados por fallo de equipo puede utilizarse la siguiente ecuación:



$$f = \frac{2n + 1}{2T}$$

donde:

$n$ : es el número de fallos del equipo

$T$ : es el intervalo de tiempo en el que ocurren los fallos (en años).

Para los errores humanos se deberá considerar la probabilidad de estos atendiendo a su naturaleza y se deberá multiplicar por el número de veces que se realiza la tarea. La frecuencia puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$f = P_{EH} \times f_T$$

donde:

$P_{EH}$ : probabilidad de error humano por tarea

$f_T$ : frecuencia anual con que se realiza la tarea

Tabla 1 - Criterios para la asignación de los niveles de frecuencia

Frecuencia cualitativa	Acrónimo	Probabilidad de ocurrencia del iniciador	Número de sucesos por año
<b>Alta</b>	$f_A$	$P \geq 1/10$	Más de 50 por año $F \geq 50$
<b>Media</b>	$f_M$	$1/1000 < P < 1/10$	Entre 1 y 50 por año $1 \leq F < 50$
<b>Baja</b>	$f_B$	$1/100000 < P < 1/1000$	Entre 1 por año y 1 cada 100 años $0.01 \leq F < 1$
<b>Muy Baja</b>	$f_{MB}$	$P < 1/100000$	Menos de 1 cada 100 años $F < 0.01$

## 1.6. Análisis de la magnitud de las consecuencias (C) asociadas a cada suceso iniciador.

Para asignar los niveles de consecuencias (C) se parte de suponer que ya ha ocurrido el suceso iniciador y coincidentemente han fallado todas las barreras. Los sucesos iniciadores identificados pueden tener consecuencias para trabajadores, pacientes y público, según sea la práctica a realizar, aunque con diferente impacto en el caso de los trabajadores, ya que éstos pueden recibir dosis considerablemente más altas.

#### 1.6.1. Consecuencias para los trabajadores y público

1) Muy altas, catastróficas o muy graves ( $C_{MA}$ ): Son aquellas que provocan efectos deterministas severos, siendo mortales o causantes de un daño permanente que reduce la calidad de vida de las personas afectadas.

2) Altas o graves ( $C_A$ ): Son aquellas que provocan efectos deterministas, pero que no representan un peligro para la vida y no producen daños permanentes a la calidad de vida.

3) Medias o moderadas ( $C_M$ ): Son aquellas que provocan exposiciones anómalas (o no previstas como normales, es decir, superan las restricciones de dosis o el límite de dosis establecidos en las regulaciones) que están por debajo de los umbrales de los efectos deterministas. Solo representan un aumento de la probabilidad de ocurrencia de efectos estocásticos.

4) Bajas ( $C_B$ ): No se producen efectos sobre los trabajadores y público, pero se degradan las medidas de seguridad.

#### 1.6.2. Consecuencias para los pacientes

Si la práctica a realizarse es de tipo médico, se debe incluir a los pacientes dentro del presente análisis. Para esto se define otra escala de consecuencias:

1) Muy altas, catastróficas o muy graves ( $C_{MA}$ ): Ocasionan muertes o daños limitantes a varios pacientes. Se asume que las magnitudes de los errores de dosis son superiores al 25% respecto a la dosis prescrita. Pueden ser por subdosis o por sobredosis.

2) Altas o graves ( $C_A$ ): Ocasionan la muerte o daños limitantes a un solo paciente, afectando a todo o gran parte del tratamiento. Se incluyen también en este nivel las exposiciones que afectan a múltiples pacientes cuyos errores de dosis están entre el 10 y el 25% respecto a la dosis prescrita (incluyendo el 25%).

3) Medias o moderadas ( $C_M$ ): Clínicamente no ponen en riesgo la vida del paciente, son exposiciones que afectan a un paciente en una sesión de tratamiento.

4) Bajas ( $C_B$ ): Disminución de la defensa en profundidad. No provocan desviaciones de dosis.

## 2. ANÁLISIS DE LAS DEFENSAS (P) EN PROFUNDIDAD: BARRERAS Y REDUCTORES.

Todo suceso iniciador que ha sido identificado será analizado para evaluar la idoneidad de las defensas existentes destinadas a evitar, prevenir, detectar, controlar y mitigar potenciales accidentes.

Las defensas de seguridad que resulten del análisis estarán dirigidas a reducir la frecuencia del suceso iniciador, detectar y controlar la ocurrencia del accidente y reducir la secuencia de los mismos. Al identificar las defensas, será necesario clasificar las mismas dependiendo de su robustez, como enclavamientos, alarmas y procedimientos.

Durante el análisis, es conveniente distinguir que existen tres tipos de defensas atendiendo al momento en que estas actúan:

Las defensas diseñadas para actuar antes que ocurra el suceso iniciador se clasificarán como reductores de frecuencia. Este tipo de defensa es la más preventiva de todas, debido a que impiden que ocurran los eventos que desencadenan el accidente.

Las defensas diseñadas para actuar antes de que ocurra el accidente y después del suceso iniciador se clasificarán como barreras. Estas barreras son muy importantes, porque en gran medida contribuyen a que los sucesos no desencadenen en un accidente, sin embargo, su fallo o indisponibilidad por lo general se mantienen ocultos hasta que ocurren los iniciadores.

Las defensas diseñadas para actuar después que ha ocurrido el accidente se clasificarán como reductores de consecuencia (mitigadores). La importancia de este tipo de barreras es más significativa en la medida en que aumenta la severidad de las consecuencias derivadas del suceso iniciador de accidente.

Criterios para la asignación de los niveles de probabilidad

La probabilidad de fallo de las defensas debe ser evaluada cuantitativamente o cualitativamente y ello estará dado por el número existente de estas y por su robustez, mientras mayor sea el número de las defensas, menor será la probabilidad de fallo de las defensas y mientras mayor sea la robustez de las mismas menor será su probabilidad de fallo. Los niveles de probabilidad de fallo asociados al número de barreras de seguridad son:

- i. Alta ( $P_A$ ): No hay ninguna barrera de seguridad.

- ii. Media ( $P_M$ ): Hay una o dos barreras de seguridad.
- iii. Baja ( $P_B$ ): Hay tres barreras de seguridad.
- iv. Muy Baja ( $P_{MB}$ ): Hay cuatro o más barreras de seguridad.

### 3. FORMA DE COMBINAR LAS VARIABLES

La matriz de riesgo es una representación de todas las combinaciones de los niveles de  $f$ ,  $P$  y  $C$ , y del nivel resultante de riesgo. El nivel de riesgo ( $R$ ) se obtiene combinando los diferentes niveles de las variables independientes, es decir la frecuencia del suceso iniciador ( $f$ ), la probabilidad de fallo de las defensas previstas ( $P$ ) y la severidad de las consecuencias ( $C$ ), se obtiene mediante la ecuación:

$$R = f \times P \times C$$

y se realiza el siguiente método para efectuar las combinaciones:

- Primero se combinan dos variables independientes y el resultado se combina a su vez con la tercera variable, dando así el nivel de la variable dependiente, es decir el nivel de riesgo  $R$ .
- Si se combinan variables del mismo nivel, por ejemplo, “Bajo”, la combinación resultante tendrá el mismo nivel, es decir, “Bajo”.

Ejemplo:

Si la frecuencia es de nivel bajo  $f_B$  y la probabilidad es baja  $P_B$ , entonces la combinación  $f_B \times P_B$  es de nivel “Bajo”.

- Si se combinan variables, de dos niveles diferentes contiguos, por ejemplo “Medio” y “Alto”, el nivel resultante será el nivel más conservador, por ejemplo, en este caso “Alto”.

Ejemplo:

Si la consecuencia es de nivel medio  $C_M$  y la probabilidad es alta  $P_A$ , entonces la combinación  $C_M \times P_A$  es de nivel “Alto”.

- Si se combinan variables, de dos niveles distintos no contiguos, por ejemplo “Bajo” y “Alto”, el nivel resultante será el nivel intermedio entre ambos. Por ejemplo, en este caso, “Medio”.

Ejemplo:

Si la frecuencia es de nivel bajo  $f_B$  y la consecuencia es alta  $C_A$ , entonces la combinación  $f_B \times C_A$  es de nivel “Medio”.

Todas las combinaciones posibles de estas variables pueden ser visualizadas en la Tabla 2, formando un arreglo llamado “Matriz de Riesgo”.

Tabla 2 - Matriz de Riesgo

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

#### 4. EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL RIESGO ASOCIADO A CADA SECUENCIA ACCIDENTAL.

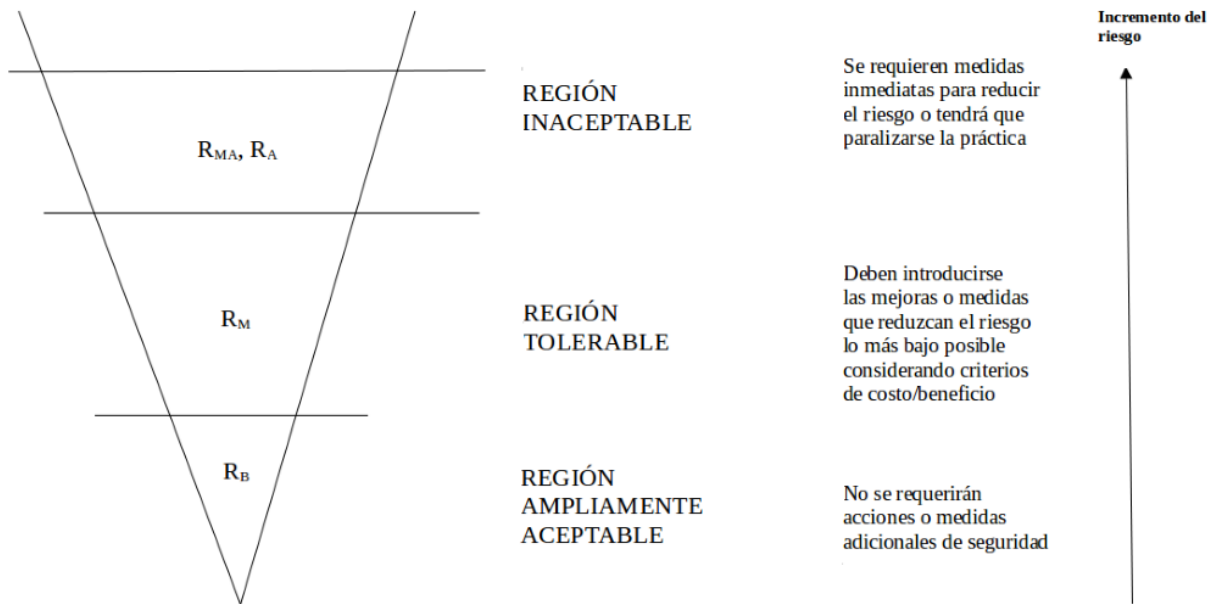
El nivel de riesgo resultante puede ser Muy Alto ( $R_{MA}$ ), Alto ( $R_A$ ), Medio ( $R_M$ ), Bajo ( $R_B$ ). Este proceso se realiza para cada uno de los sucesos iniciadores postulados. Es importante comprender que el resultado de la aplicación de la metodología se obtienen niveles de riesgo y no valores de riesgo.

#### 5. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ACEPTABILIDAD DEL RIESGO.

Aplicando la metodología de la Matriz de Riesgo se realiza una clasificación de todas las secuencias accidentales en los diferentes niveles de riesgo, estos resultados forman un primer cribado o filtrado que permite identificar las secuencias de riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ ) y Alto ( $R_A$ ). Las secuencias con niveles de riesgo Medio ( $R_M$ ) y Bajo ( $R_B$ ) pueden excluirse para otros tipos

de análisis posteriores atendiendo el enfoque conservador del método y a los criterios aceptabilidad de riesgo que se muestran en la Figura 2:

Figura 2 - Aceptabilidad del Riesgo



El riesgo "bajo" y el riesgo "medio" son considerados aceptables para la metodología. Los niveles de riesgo "alto" y "muy alto" son considerados inaceptables y deberán tomarse medidas para reducir el nivel de riesgo para cada uno de los sucesos iniciadores.

## 6. GESTIÓN Y REDUCCIÓN DEL RIESGO

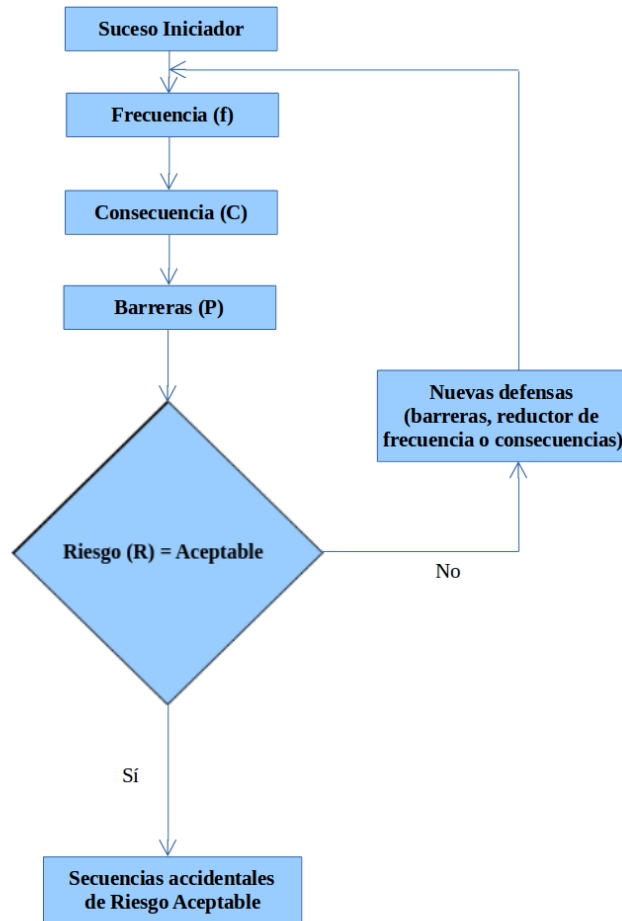
Para aquellas secuencias accidentales que tengan un riesgo inaceptable, se deberán evaluar las acciones más efectivas para disminuir el riesgo:

- Implementar nuevas barreras.
- Implementar nuevos reductores de frecuencia
- Implementar nuevos reductores de consecuencia, especialmente en aquellos casos donde la severidad de las consecuencias sea muy grave.

Es recomendable que al seleccionar implementar una nueva defensa (barreras, reductor de frecuencia o consecuencia) se reevalúe el riesgo siguiendo una secuencia tal y como se muestra en la Figura 3.

Al implementar nuevas defensas se debería evaluar la efectividad de las mismas susceptible a la mejora que se pretende introducir.

Figura 3 - Proceso para Implementar Nuevas Defensas



Se deben implementar nuevas barreras, reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para disminuir el riesgo de cada suceso iniciador a un nivel de riesgo aceptable (medio o bajo).

## 7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA

Para evaluar el riesgo empleando cualquiera de los métodos utilizados se seguirán los siguientes pasos:

1. Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.
2. Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la "Etapa", en otra columna "Suceso Iniciador" y en otra

columna "Personas afectadas". Luego se ordenan en por columna "Etapa", en otra columna "Suceso Iniciador" y en otra columna "Personas afectadas".

3. Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2 - Matriz de Riesgo del documento principal. Luego se ordenan las cuatro variables en cada columna como "f", "P", "C" y "R" en una tabla.
4. De la tabla anterior, se realiza un conteo en la columna "Riesgo (R)" de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y se visualizan en una tabla.
5. Los datos de la tabla del paso anterior se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta nivel bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.
6. Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.
7. Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.
8. Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

Esta metodología se aplicará en ejemplos que se encuentran en la sección de Anexos.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades. Requisitos de Seguridad Generales, Parte 4.* Organismo Internacional de Energía Atómica.
- [2] IAEA-TECDOC-1685/S. *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia. Texto Principal y Apéndices.*
- [3] IAEA-TECDOC-1670/S. *Aplicación del método de la matriz de riesgo en Radiografía Industrial. Volumen 1, Texto Principal y Apéndices.* Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares.
- [4] *Análisis Probabilista de Seguridad de Tratamientos de Radioterapia con Acelerador Lineal.* Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares.
- [5] *Evaluación de la seguridad radiológica en la práctica de perfilaje de pozos utilizando matrices de riesgo.* Adrián Alles Leal, Yolanda Pérez Reyes, Cruz Duménigo González
- [6] *EVALUACIONES DE SEGURIDAD DE LA PRÁCTICA DE MEDICINA NUCLEAR UTILIZANDO EL MÉTODO DE MATRICES DE RIESGO.* Cruz Duménigo, Mayka Guerrero, Yoanis Cruz y Karen Soler.
- [7] *APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO PARA EVALUACIONES DE SEGURIDAD EN TELETERAPIA CON ACELERADORES Y BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA DE DOSIS.* C. Duménigo; M.L. Ramírez; P. Ortiz; J. McDonnell; J.L. Morales; S. Papadopulos; P.P. Pereira; R. López, A. Pérez Muñoz.
- [8] *GUÍA PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MATRICES DE RIESGO EN SERVICIOS DE RADIOTERAPIA.* SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA MÉDICA.
- [9] *ALMACENAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS. GUÍA DE SEGURIDAD NO.WS-G-6.1.* IAEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
- [10] *GESTIÓN PREVIA A LA DISPOSICIÓN FINAL DE DESECHOS RADIATIVOS DE ACTIVIDAD BAJA E INTERMEDIA. GUÍA DE SEGURIDAD NO.WS-G-2.5.* IAEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

## 9. ANEXOS: EJEMPLOS DE APLICACIÓN POR PRÁCTICA

En esta sección se encuentran ejemplos de diferentes prácticas donde se aplica la metodología descrita en la sección 7.

### 9.1. ANEXO 1: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA DE DOSIS

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

#### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la práctica es Braquiterapia de Alta de Dosis, en la cual se utilizará fuentes de Ir-192 con una actividad nominal de 370 GBq (10 Ci).

#### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

#### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de explotación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público

Identificación de los sucesos iniciadores de accidentes en correspondencia con las particularidades de la práctica. Se incluyen todos los errores humanos, fallos de equipos y sucesos externos o la combinación de ellos que potencialmente pueden conllevar a la ocurrencia de accidente. La identificación de los sucesos iniciadores puede realizarse utilizando métodos estándar de identificación de peligros tales como: Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA), Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP). Descripción de cada suceso iniciador, barreras de seguridad existentes para prevenir o mitigar los accidentes.

Las barreras y medidas necesarias para controlar el peligro se diferencian en tres tipos: enclavamientos de seguridad, alarmas o advertencias de seguridad, y procedimientos de seguridad y emergencias

#### Evaluación de la seguridad

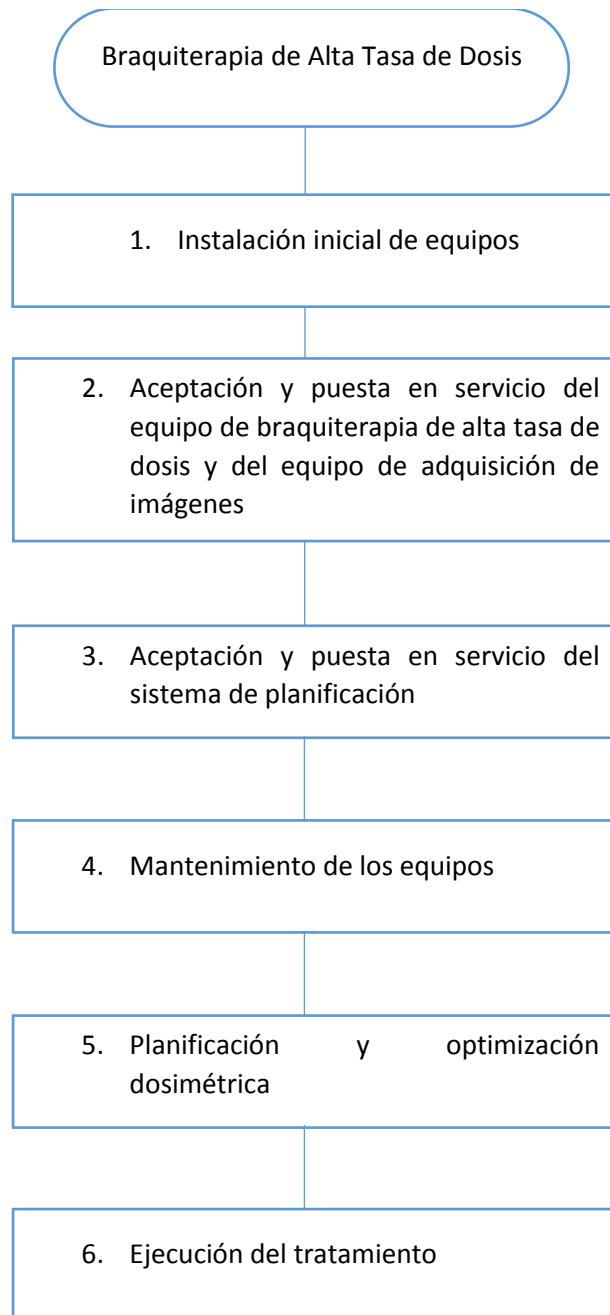
Para realizar la evaluación de seguridad se tomaran dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 5 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA DE DOSIS

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Personas afectadas
1. Instalación inicial de equipos	1.1 Suministro de fuente equivocada.	Paciente
	1.2 Atascamiento anómalo de la fuente durante el cambio o carga de la misma.	TOE
	1.3 Deficiencias en el blindaje de la sala.	TOE, Público
2. Aceptación y puesta en servicio del equipo de braquiterapia de alta tasa de dosis y del equipo de adquisición de imágenes	2.1 Error de calibración de la cámara y electrómetro.	Paciente
	2.2 Utilización de valores incorrectos de decaimiento de la fuente.	
	2.3 Dejar incompleta la puesta en servicio de los equipos de imagen.	
3. Aceptación y puesta en servicio del sistema de planificación	3.1 Error al introducir el periodo de semi-desintegración de la fuente.	Paciente
	3.2 Error al introducir los factores de corrección.	
	3.3 Fallo del TPS al calcular los valores de la función geométrica a partir de la fórmula.	
4. Mantenimiento de los equipos	4.1 No registrar adecuadamente la realización de modificaciones a parámetros del equipo durante la realización de trabajos de mantenimiento.	Paciente
	4.2 Iniciar la irradiación cuando un trabajador se mantiene dentro de la sala de tratamiento	TOE

	mientras se realizan tareas de mantenimiento del equipo.	
	4.3 Atascarse la fuente durante los trabajos de cambio de fuente.	TOE
	4.4 Falla en el blindaje de los contenedores de transporte de fuentes.	TOE, Público
5. Planificación y optimización dosimétrica	5.1 Registrar por error un valor de dosis total de tratamiento, dosis por fracción o fraccionamiento diferente al valor prescrito en la hoja de tratamiento.	Paciente
	5.2 Planificación hecha erróneamente sobre los datos de un paciente equivocado.	
	5.3 Errores en la ubicación de los puntos de normalización.	
6. Ejecución del tratamiento	6.1 Llamar para tratamiento paciente equivocado.	Paciente
	6.2 Fallo en el temporizador que controla el tiempo de exposición.	
	6.3 Intento de entrada imprevista del trabajador a la sala de tratamiento durante la irradiación de un paciente.	Trabajador
	6.4 Desacople de la fuente del cable quedando en la sala de tratamiento fuera de su blindaje.	
	6.5 Intento de entrada imprevista de un miembro del público a la sala de tratamiento durante la irradiación de un paciente.	Público
	6.6 Perdida o extravío de una fuente gastada almacenada temporalmente en el hospital.	
	6.7 Iniciar irradiación con un miembro del público dentro de la sala de tratamiento inadvertidamente.	

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA DE DOSIS

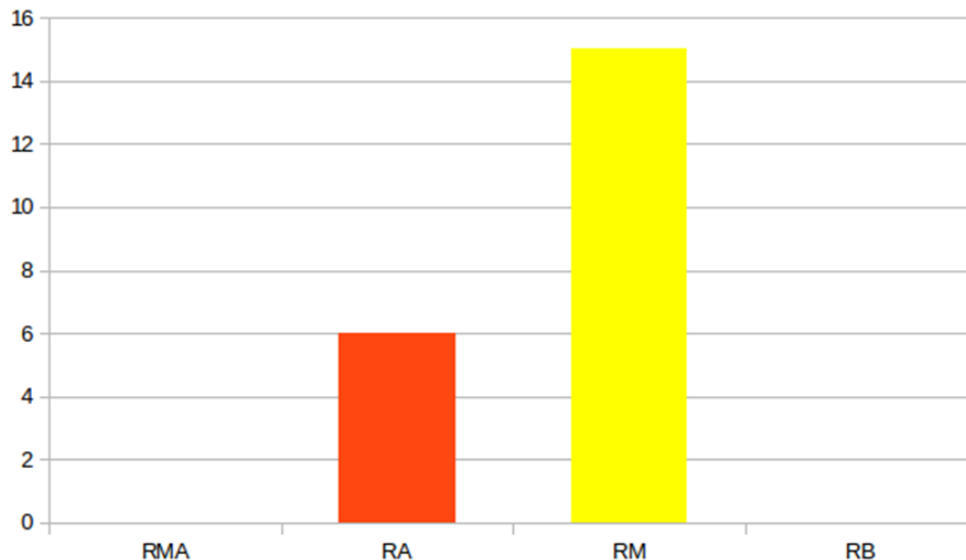
Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	1.3	$f_B$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
2	2.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.3	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
3	3.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
	3.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
	3.3	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
4	4.1	$f_B$	$C_B$	$P_A$	$R_M$
	4.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	4.3	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	4.4	$f_{MB}$	$C_A$	$P_M$	$R_M$
5	5.1	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
	5.2	$f_B$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
	5.3	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
6	6.1	$f_B$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
	6.2	$f_{MB}$	$C_A$	$P_M$	$R_M$
	6.3	$f_M$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
	6.4	$f_B$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	6.5	$f_M$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_M$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>21</b>
Sucesos Iniciadores con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Sucesos Iniciadores con Riesgo Alto ( $R_A$ )	6
Sucesos Iniciadores con Riesgo Medio ( $R_M$ )	15
Sucesos Iniciadores con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=1$  min, a una distancia de 50 cm

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{370 \times 10^9 Bq \cdot 1.599 \times 10^{-4} \frac{mSv m^2}{10^6 Bq hr}}{(0.5m)^2} \cdot 1 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 3.94 \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$3.94 \frac{mSv}{año} < 20 \frac{mSv}{año}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3.94}{20} = 0.20$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1. Se considera una buena práctica.



**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad. Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de 8 cm.

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{370 \times 10^9 \text{Bq} \cdot 1.599 \times 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{Bqhr}} \cdot 10 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}}{(0.08 \text{m})^2}$$

$$D = 1540.70 \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$1540.70 \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{1540.70}{20} = 77.04$$

El nivel de riesgo es muy alto según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo

	<b>1</b>	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo
--	----------	----------	--

## 9.2. ANEXO 2: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON BRAQUITERAPIA DE BAJA TASA DE DOSIS

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la práctica es Braquiterapia de Alta de Dosis, en la cual se utilizará fuentes de Ir-192 con una actividad nominal de 37 GBq (1 Ci).

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de explotación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público

Identificación de los sucesos iniciadores de accidentes en correspondencia con las particularidades de la práctica. Se incluyen todos los errores humanos, fallos de equipos y sucesos externos o la combinación de ellos que potencialmente pueden conllevar a la ocurrencia de accidente. La identificación de los sucesos iniciadores puede realizarse utilizando métodos estándar de identificación de peligros tales como: Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA), Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP). Descripción de cada suceso iniciador, barreras de seguridad existentes para prevenir o mitigar los accidentes.

Las barreras y medidas necesarias para controlar el peligro se diferencian en tres tipos: enclavamientos de seguridad, alarmas o advertencias de seguridad, y procedimientos de seguridad y emergencias

## Evaluación de la seguridad

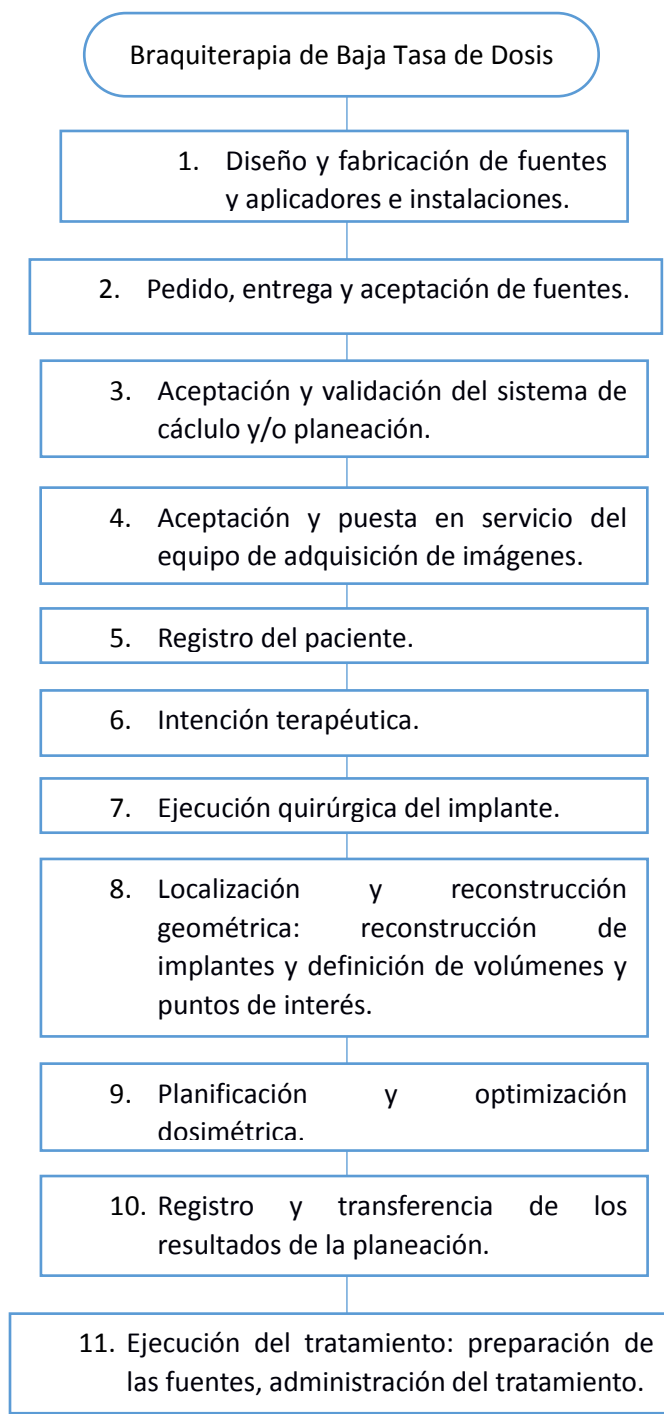
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

### Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "Braquiterapia de Baja Tasa de Dosis".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE BRAQUITERAPIA DE BAJA TASA DE DOSIS

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Diseño y fabricación de fuentes y aplicadores e instalaciones.	1.1 Diseño inadecuado de los aplicadores o con defectos de fabricación.	Paciente
	1.2 Blindaje inadecuado del cuarto de tratamiento.	TOE, Público
	1.3 Blindaje inadecuado del almacén de resguardo de fuentes.	TOE, Público
2. Pedido, entrega y aceptación de fuentes.	2.1 Suministro de fuentes equivocadas por el proveedor.	Paciente
	2.2 Utilización de valores incorrectos de decaimiento de la fuente.	
	2.3 Adquisición de aplicadores y accesorios con defectos de fabricación.	
3. Aceptación y validación del sistema de cálculo y/o planeación.	3.1 Error al introducir el periodo de semi-desintegración de la fuente en el TPS.	Paciente
	3.2 Fallo del TPS al calcular los valores de la función geométrica a partir de la fórmula.	
	3.3 Fallo del TPS al generar los valores de los términos de las matrices de dosis.	
4. Aceptación y puesta en servicio del equipo de adquisición de imágenes.	4.1 Dejar incompleta la puesta en servicio de los equipos de imagen.	Paciente
5. Registro del paciente.	5.1 Error al registrar los datos administrativos del paciente	Paciente
6. Intención terapéutica.	6.1 Omitir en la hoja de tratamiento órganos de riesgo definidos durante la prescripción clínica del tratamiento.	Paciente
	6.2 Registrar un valor erróneo de dosis que no debe sobrepasarse en los órganos de riesgo, asignado por	

	el médico u omitir dicho valor.	
7. Ejecución quirúrgica del implante.	7.1 Llamar para hacer la ejecución quirúrgica del implante a paciente erróneo.	Paciente
	7.2 Seleccionar erróneamente los implantes que serán utilizados o su posición en el paciente, lo cual provoca desplazamiento del implante.	
8. Localización y reconstrucción geométrica: reconstrucción de implantes y definición de volúmenes y puntos de interés.	8.1 Cometer errores al reconstruir las coordenadas de la posición de las fuentes ficticias en el TPS a partir de las imágenes.	Paciente
	8.2 Ubicar erróneamente alguno de los puntos de interés a partir de las imágenes.	
9. Planificación y optimización dosimétrica.	9.1 Interpretar erróneamente los datos de la intención terapéutica al realizar la planificación del tratamiento.	Paciente
	9.2 Error de ubicación de los puntos de dosis para optimización.	
	9.3 Error en el cálculo del tiempo de tratamiento por fallo del TPS.	
10. Registro y transferencia de los resultados de la planeación.	10.1 Cometer errores al registrar los resultados de la planificación en la hoja de tratamiento.	
11. Ejecución del tratamiento: preparación de las fuentes, administración del tratamiento.	11.1 Selección errónea de las fuentes, según el plan de tratamiento.	Paciente
	11.2 Preparación errónea de fuentes debido al uso de la prescripción de un paciente erróneo.	
	11.3 Preparar un número erróneo de semillas para ser implantadas al paciente.	
	11.4 Desprenderse alguna fuente de su aplicador o implante durante el tratamiento.	
	11.5 Culminar erróneamente el tratamiento antes de completar el tiempo de tratamiento.	
	11.6 Implantar por error una cantidad de semillas diferente a la planificada.	
	11.7 Pérdida o extravío de una o varias fuentes.	Paciente, Público

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA BRAQUITERAPIA DE BAJA TASA DE DOSIS

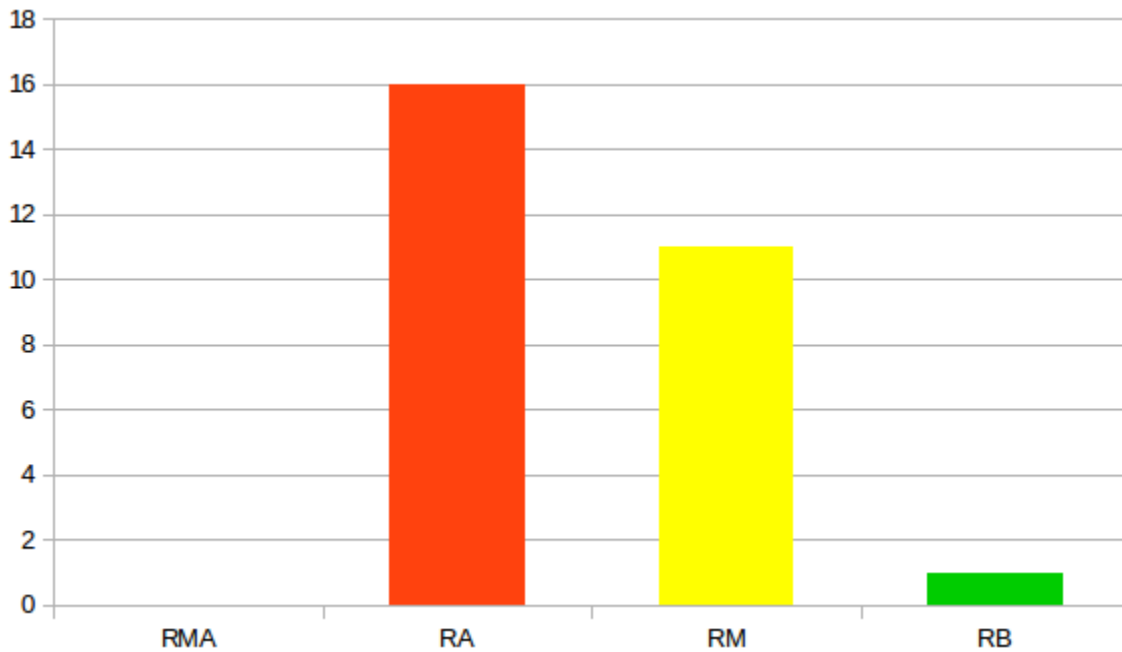
Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
	1.3	$f_{MB}$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
	2.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.3	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
3	3.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
	3.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	3.3	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
4	4.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
5	5.1	$f_B$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
6	6.1	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
	6.2	$f_M$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_M$
7	7.1	$f_B$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
	7.2	$f_B$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
8	8.1	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	8.2	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
9	9.1	$f_B$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	9.2	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	9.3	$f_{MB}$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
10	10.1	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
11	11.1	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
	11.2	$f_B$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_B$
	11.3	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
	11.4	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	11.5	$f_B$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	11.6	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	11.7	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>28</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	16
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	11
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	1

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=5$  min, a una distancia de 5 cm

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{3.7 \times 10^9 Bq \cdot 1.599 \times 10^{-4} \frac{mSv \cdot m^2}{10^6 Bq \cdot hr}}{(0.05m)^2} \cdot 5 \min \frac{1 hr}{60 \min}$$

$$D = 19.72 \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$19.72 \frac{mSv}{año} < 20 \frac{mSv}{año}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{19.72}{20} = 0.99$$

El nivel de riesgo es alto según la Tabla I de la sección 1.1. Se recomienda aplicar barreras, reductores de frecuencias para reducir el riesgo.



**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Se consideran las condiciones: entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad.

Tiempo de exposición,  $t=15$  min, a una distancia de 5 cm.

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{3.7 \times 10^9 Bq \cdot 1.599 \times 10^{-4} \frac{mSv \cdot m^2}{10^6 Bq \cdot hr}}{(0.05m)^2} \cdot 15 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 59.16 \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$59.16 \frac{mSv}{año} < 20 \frac{mSv}{año}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{59.16}{20} = 2.95$$

El nivel de riesgo es muy alto según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es aceptable, pero deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo

### 9.3. ANEXO 3: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON IRRADIADORES INDUSTRIALES

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

#### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará fuentes de Co-60 con una actividad nominal de 440 TBq (12 kCi).

#### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

#### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de explotación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.

Identificación de los sucesos iniciadores de accidentes en correspondencia con las particularidades de la práctica. Se incluyen todos los errores humanos, fallos de equipos y sucesos externos o la combinación de ellos que potencialmente pueden conllevar a la ocurrencia de accidente. La identificación de los sucesos iniciadores puede realizarse utilizando métodos estándar de identificación de peligros tales como: Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA), Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP). Descripción de cada suceso iniciador, barreras de seguridad existentes para prevenir o mitigar los accidentes.

Las barreras y medidas necesarias para controlar el peligro se diferencian en tres tipos: enclavamientos de seguridad, alarmas o advertencias de seguridad, y procedimientos de seguridad y emergencias

## Evaluación de la seguridad

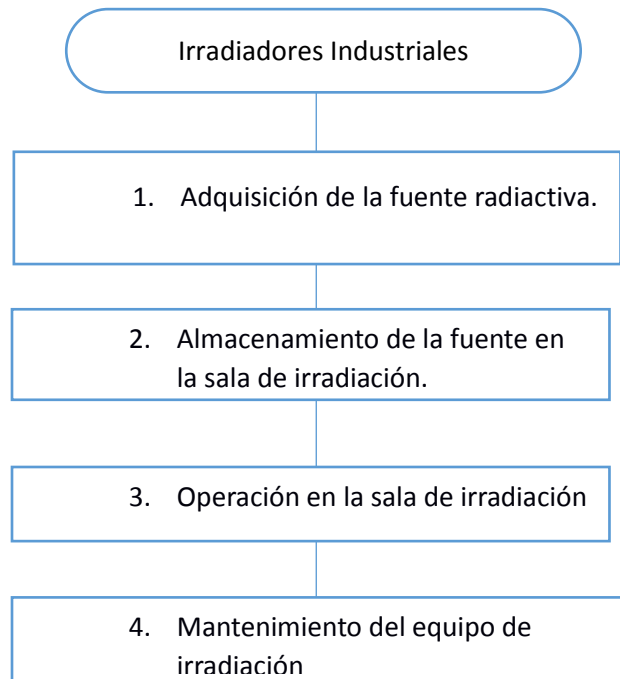
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

### Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "Irradiadores Industriales".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE IRRADIADORES INDUSTRIALES

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Adquisición de la fuente radiactiva	1.1 Error humano al gestionar el envío de una fuente no hermética, que provoca contaminación.	TOE, Público
	1.2 Error humano del encargado de realizar el pedido.	TOE
2. Almacenamiento de la fuente en la sala de irradiación.	2.1 Intento de entrada no autorizada de un intruso al almacén con el propósito de sustraer los equipos de esterilización que contienen fuentes radiactivas, y posterior pérdida en el dominio público.	Público
	2.2 Errores humanos en la construcción de la sala de irradiación (densidad inadecuada del hormigón, espesor insuficiente del blindaje, penetraciones que permiten escapes...) .	TOE
	2.3 Error humano al usar un contenedor inadecuado para almacenar fuentes en desuso, provocando exposiciones a las personas que se acercan.	TOE, Público
3. Operación en la sala de irradiación	3.1 Exposición de la fuente con un operador que quedo inadvertidamente dentro de la sala.	TOE
	3.2 Error al acoplar el tubo guía al equipo que se desacopla con fuente expuesta e impide el regreso de la fuente a su posición de seguridad.	TOE
	3.3 Intento de miembros del público de entrada a la sala de irradiación cuando la fuente está expuesta.	TOE, Público
4. Mantenimiento del equipo de irradiación	4.1 Caída inadvertida de la fuente al realizar el mantenimiento al sistema de bloqueo y pérdida en el dominio público.	Público
	4.2 Error durante el mantenimiento de los sistemas de bloqueo que provoca la salida de la fuente.	TOE

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables  $f$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $R$  tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA DE IRRADIADORES INDUSTRIALES

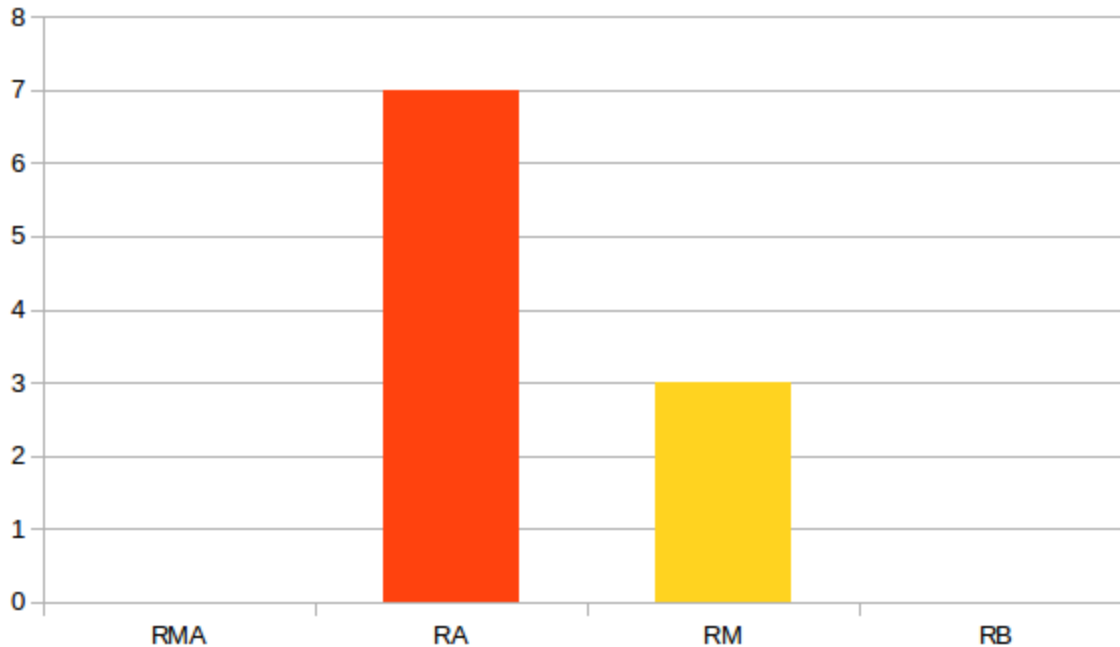
Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia ( $f$ )	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
	2.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	2.3	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
3	3.1	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	3.2	$f_M$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	3.3	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
	4.2	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “Riesgo (R)” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>10</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	7
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	3
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

### Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

#### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=5\text{min}$ , a una distancia de 10 m, factor “Pb” de atenuación asociado al blindaje.

$$Pb=1 \times 10^{-5}$$

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{440 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(10 \text{ m})^2} \cdot 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 5 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 0.0013577 \text{ mSv}$$

Se asume que esta exposición ocurre con una frecuencia anual de 2000 veces.

$$D = 0.0013577 \text{ mSv} \times \frac{2000 \text{ veces}}{\text{año}} = 2.71 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$2.71 \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{2.71}{20} = 0.1355$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera aceptable.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad, en la que se pierde el blindaje de la fuente. Tiempo de exposición, t=15 min, a una distancia de 5 cm.

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{440 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(10 \text{ m})^2} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 5 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 135.77 \text{ mSv}$$

Se asume que esta exposición ocurre con una frecuencia anual de 1 vez. Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el público.

$$135.77 \frac{\text{Sv}}{\text{año}} \gg 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{135.77}{20} = 6.7885$$

El nivel de riesgo es muy alto según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.

### Recursos adicionales

Software gratuito para realizar la evaluación de riesgo, elaborado por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares:

Haga clic acá - <http://www.foroiberam.org/web/guest/matriz-de-riesgo-ri>



## 9.4. ANEXO 4: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON RADIOTERAPIA DE HACES EXTERNOS CON COBALTO 60

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará fuentes de Co-60 con una actividad nominal de 550 TBq (15 kCi).

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de teleterapia, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

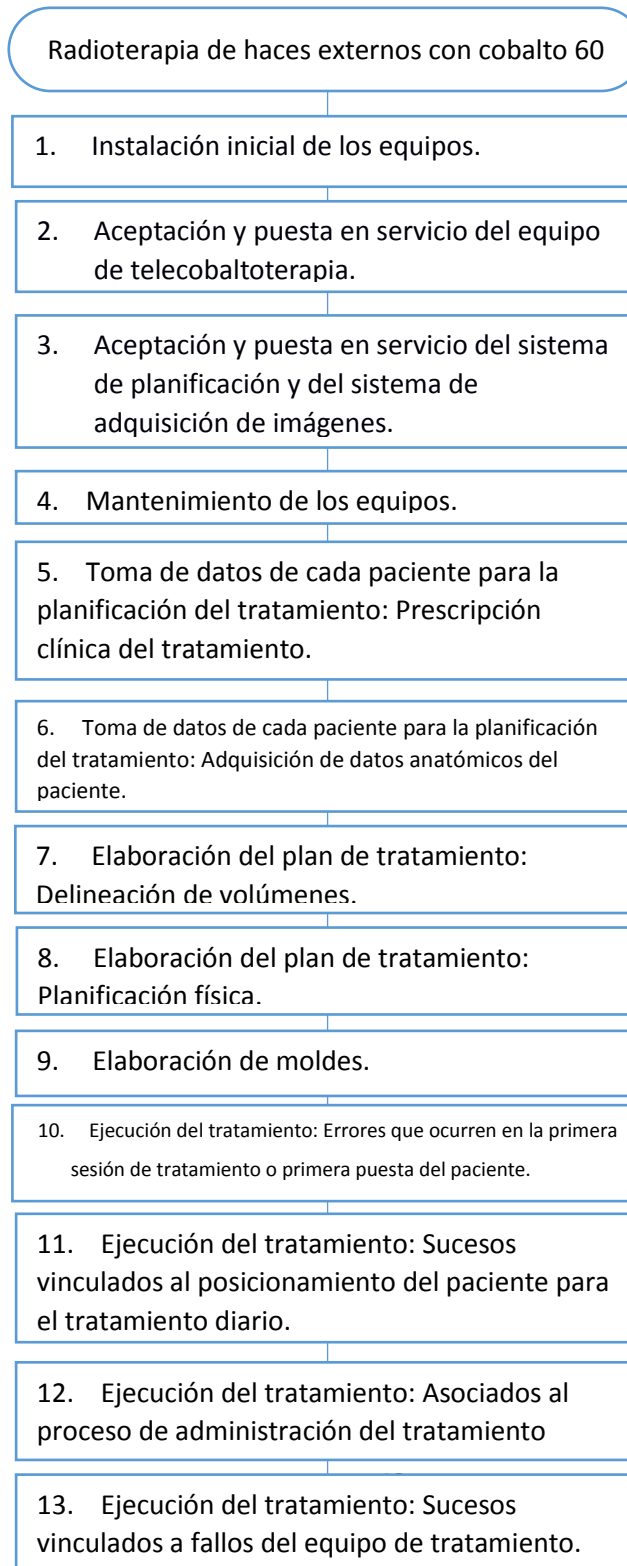
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "Radioterapia de haces externos con cobalto 60".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA CON RADIOTERAPIA DE HACES EXTERNOS CON COBALTO 60

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Instalación inicial de los equipos.	1.1 Deficiencia de producción, al fabricar la fuente de Co-60.	Paciente
	1.2 Alineación incorrecta de la fuente.	
	1.3 Atascarse la fuente radiactiva durante el cambio o carga de la misma.	TOE
	1.4 Deficiencias en el blindaje de la sala.	Público
2. Aceptación y puesta en servicio del equipo de telecobaltoterapia.	2.1 Cometer un error con los parámetros geométricos del haz de radiación.	Paciente
	2.2 Error al registrar los resultados de las mediciones realizadas durante la puesta en servicio para ser introducidas al sistema de planificación del tratamiento.	
	2.3 Generar de forma incorrecta las tablas con datos para planificación del tratamiento que se utilizan en planificaciones manuales.	
3. Aceptación y puesta en servicio del sistema de planificación y del sistema de adquisición de imágenes.	3.1 Error en los datos de caracterización y rendimiento del haz de Co-60 en el TPS.	Paciente
	3.2 Realizar una puesta en servicio incompleta del TAC, dando lugar a errores en las escalas de densidad y geométricas.	
4. Mantenimiento de los equipos.	4.1 Modificación errónea de parámetros críticos del equipo al hacer una reparación.	Paciente

	4.2 Iniciar la irradiación cuando un trabajador se mantiene dentro de la sala de tratamiento mientras se realizan tareas de mantenimiento del equipo.	TOE
5. Toma de datos de cada paciente para la planificación del tratamiento: Prescripción clínica del tratamiento.	5.1 Omitir en la hoja de tratamiento órganos de riesgo definidos durante la prescripción clínica del tratamiento.	Paciente
	5.2 Registrar en la hoja de tratamiento un valor de dosis total que no coincide con la prescripción.	
	5.3 Registrar en la hoja de tratamiento un valor de dosis diaria que no coincide con la prescripción.	
6. Toma de datos de cada paciente para la planificación del tratamiento: Adquisición de datos anatómicos del paciente.	6.1 Llamar para hacer la TAC de simulación a paciente erróneo.	Paciente
	6.2 Realizar la TAC de simulación con parámetros geométricos erróneos.	
	6.3 Obtener una imagen errónea por fallos del TAC.	
7. Elaboración del plan de tratamiento: Delineación de volúmenes.	7.1 Error en la identificación del paciente durante la elaboración del plan de tratamiento. Planificar tratamiento de un paciente con datos correspondientes a otro paciente.	Paciente
	7.2 Omitir denominar en el TPS uno, varios o todos los órganos de riesgos.	
	7.3 Digitalizar erróneamente el contorno anatómico individual, el volumen blanco y órganos críticos.	
8. Elaboración del plan de tratamiento: Planificación física.	8.1 Utilizar erróneamente el TPS al elaborar el plan de tratamiento para un paciente en específico.	Paciente
	8.2 Seleccionar datos erróneos al planificar el tratamiento, tales como los de una fuente diferente a la existente en el equipo o datos de otro equipo que se encuentre modelado en el TPS.	

	8.3 Seleccionar una dirección errónea del (los) campo(s).	
	8.4 Omitir la planificación de volúmenes secundarios requeridos.	
9. Elaboración de moldes.	9.1 Omitir la elaboración de bloques de conformación personalizados.	Paciente
	9.2 Cometer un error al elaborar los accesorios personalizados.	
10. Ejecución del tratamiento: Errores que ocurren en la primera sesión de tratamiento o primera puesta del paciente.	10.1 Llamar para el inicio de tratamiento a paciente erróneo.	Paciente
	10.2 Colocar erróneamente al paciente en la mesa de tratamiento para la sesión inicial del tratamiento.	
	10.3 Seleccionar erróneamente de las dimensiones del campo en la sesión inicial del tratamiento.	
11. Ejecución del tratamiento: Sucesos vinculados al posicionamiento del paciente para el tratamiento diario.	11.1 Omitir llevar a cabo las modificaciones del plan de tratamiento resultantes del control médico semanal.	Paciente
	11.2 Intentar la colocación erróneamente al paciente en la mesa de tratamiento durante el posicionamiento para el tratamiento diario.	
	11.3 Errores al ubicar el paciente respecto al isocentro debido a errores humanos.	
12. Ejecución del tratamiento: Asociados al proceso de administración del tratamiento diario.	12.1 Intentar omitir una sesión de tratamiento diario y que la misma no sea recuperada.	Paciente
	12.2 Selección errónea, en el panel de control del equipo, de parámetros diferente de lo prescrito en la planilla de tratamiento.	
	12.3 Fallo de equipo con movimiento indeseado de la mesa del paciente, gantry o colimador.	
13. Ejecución del tratamiento: Sucesos vinculados a fallos del equipo de tratamiento.	13.1 El trabajador intenta entrar a la sala de tratamiento con la fuente expuesta.	TOE, Público
	13.2 Iniciar irradiación del	

	paciente con un técnico dentro de la sala de tratamiento inadvertidamente.	
--	--	--

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
	1.2	$f_{MB}$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
	1.3	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	1.4	$f_{MB}$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	2.2	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.3	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
3	3.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	3.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
4	4.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	4.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
5	5.1	$f_M$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_M$
	5.2	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
	5.3	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
6	6.1	$f_B$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_B$
	6.2	$f_M$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_M$
	6.3	$f_B$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
7	7.1	$f_B$	$C_A$	$P_B$	$R_M$
	7.2	$f_M$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_M$
	7.3	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
8	8.1	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	8.2	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	8.3	$f_M$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_M$
	8.4	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
9	9.1	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
	9.2	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
10	10.1	$f_B$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_B$
	10.2	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	10.3	$f_M$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
11	11.1	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_B$
	11.2	$f_M$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
	11.3	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
12	12.1	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
	12.2	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_A$
	12.3	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$

13	13.1	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
	13.2	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
	13.3	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_M$
	13.4	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables  $f$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $R$  tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA RADIOTERAPIA DE HACES EXTERNOS CON COBALTO 60

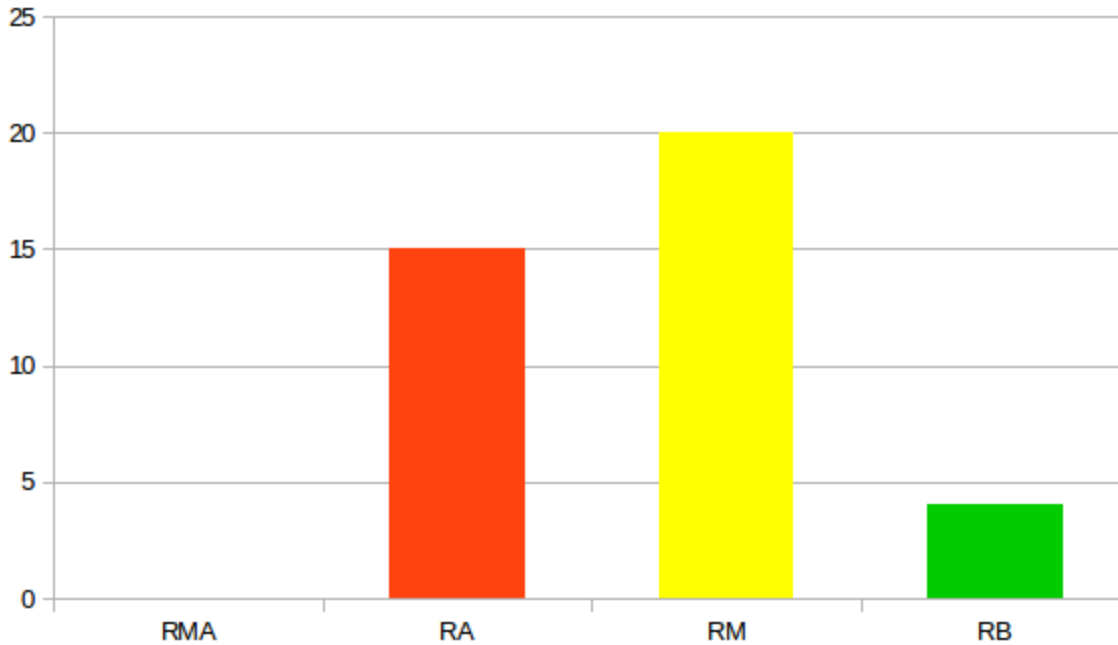
**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>39</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	15
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	20
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	4

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.





**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de  $d=3\text{ m}$ , factor de atenuación asociado al blindaje,  $Pb = 1 \times 10^{-7}$

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(3\text{m})^2} \cdot 1 \times 10^{-7} \frac{\text{mSv} \cdot \text{m}^2}{10^6 \text{Bq} \cdot \text{hr}} \cdot 10 \text{min} \frac{1 \text{hr}}{60 \text{min}}$$

$$D = 0.0037 \text{mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto. Se asume que esta exposición es para el tratamiento de 40 pacientes diarios, durante la semana laboral, considerando 50 semanas efectivas al año, esto es equivalente a 10000 exposiciones por año.

$$D = 0.0013577 \text{mSv} \times \frac{10000 \text{veces}}{\text{año}} = 3.77 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

$$3.77 \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3.77}{20} = 0.1885$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera una práctica aceptable.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Proceso de recambio ineficiente dejando el cabezal abierto con la fuente expuesta: fractura en el blindaje. Detector mal calibrado.

Tiempo de exposición, t=30min, a una distancia de 50 cm

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(0.5\text{m})^2} \cdot 1 \times 10^{-3} \frac{\text{mSv} \cdot \text{m}^2}{10^6 \text{Bq} \cdot \text{hr}} \cdot 30 \text{min} \frac{1 \text{hr}}{60 \text{min}}$$

$$D = 407.3 \text{mSv} = 0.4073 \text{Sv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto. Se asume que esta exposición es para el trabajador técnico que realiza el recambio de fuente en el cabezal, esta persona es un TOE. Se asume que la frecuencia de este evento es una vez cada 5 años.

$$407.3 \frac{mSv}{año} \gg 20 \frac{mSv}{año}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{407.3}{20} = 20.37$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.

### Recursos adicionales

Software gratuito para realizar la evaluación de riesgo, elaborado por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares:

Haga clic acá - <http://www.foroiberam.org/sevrra>

## 9.5. ANEXO 5: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES INDUSTRIALES RELACIONADAS CON FUENTES GAMMA

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará fuentes de Cs-137 con una actividad nominal de 370 GBq (10 Ci).

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador y público, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de fuentes gamma industriales, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

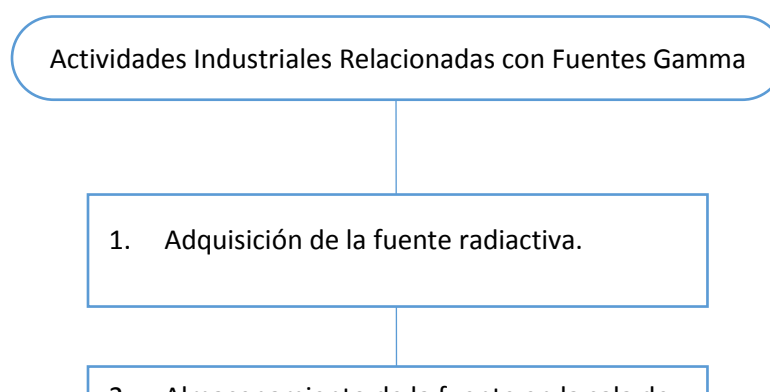
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

### Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

Figura A - Etapas para la práctica relacionada con "Actividades Industriales Relacionadas con Fuentes Gamma".



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA INDUSTRIAL RELACIONADA CON FUENTES GAMMA

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Adquisición de la fuente radiactiva	1.1 Error humano al gestionar el envío de una fuente no hermética, que provoca contaminación.	TOE, Público
	1.2 Error humano del encargado de realizar el pedido.	TOE
2. Almacenamiento de la fuente en la sala de irradiación.	2.1 Intento de entrada no autorizada de un intruso al almacén con el propósito de sustraer los equipos de esterilización que contienen fuentes radiactivas, y posterior pérdida en el dominio público.	Público
	2.2 Errores humanos en la construcción de la sala de irradiación (densidad inadecuada del hormigón, espesor insuficiente del blindaje, penetraciones que permiten escapes, etc).	TOE
	2.3 Error humano al usar un contenedor inadecuado para almacenar fuentes en desuso, provocando exposiciones a las personas que se acercan.	TOE, Público
	2.4 Error humano al almacenar los equipos con la fuente fuera de la posición de máximo blindaje.	TOE
3. Operación en la sala de irradiación	3.1 Exposición de la fuente con un operador que quedo inadvertidamente dentro de la sala.	TOE
	3.2 Error al acoplar el tubo guía al equipo que se desacopla con fuente expuesta e impide el regreso de la fuente a su posición de seguridad.	TOE
	3.3 Intento de miembros del público de entrada a la sala de irradiación cuando la fuente está expuesta.	TOE, Público
	3.4 Intento de uso del equipo por miembros del público que desconoce sus riesgos.	Público

4. Mantenimiento del equipo de irradiación	4.1 Caída inadvertida de la fuente al realizar el mantenimiento al sistema de bloqueo y pérdida en el dominio público.	Público
	4.2 Error durante el mantenimiento de los sistemas de bloqueo que provoca la salida de la fuente.	TOE
	4.3 Atascamiento de la fuente durante el transvase de la misma desde el contenedor de transvase y viceversa.	TOE

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables  $f$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $R$  tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA INDUSTRIAL RELACIONADA CON FUENTES GAMMA

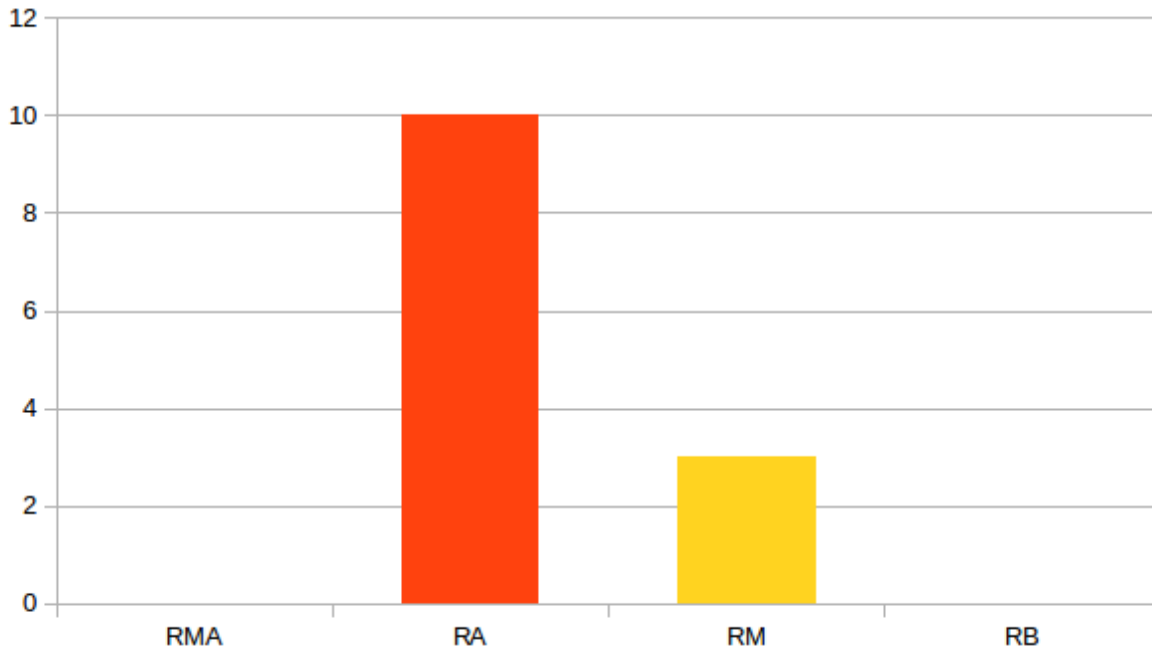
Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
	2.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	2.3	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	2.4	$f_M$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
3	3.1	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	3.2	$f_M$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	3.3	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	3.4	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
	4.2	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
	4.3	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>13</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	10
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	3
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=5$  min, a una distancia de 5 m, factor de atenuación asociado al blindaje,  $Pb = 1 \times 10^{-5}$

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{370 \times 10^9 \text{ Bq} \cdot 1.032 \times 10^{-4}}{(5\text{m})^2} \cdot 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 5 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 1.27 \times 10^{-6} \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$1.27 \times 10^{-6} \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{1.27 \times 10^{-6}}{20} = 6.35 \times 10^{-6}$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera una práctica aceptable.



**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad.

Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de 3 m

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{Bq hr}} \cdot 10 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}}{(3\text{m})^2}$$

$$D = 3771 \text{ mSv} = 3.771 \text{ Sv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el público

$$3.771 \frac{\text{Sv}}{\text{año}} \gg 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3771}{20} = 188.55$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.

## 9.6. ANEXO 6: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON PERFILAJE DE POZOS

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará fuentes de Am/Be-241 con una actividad nominal de 185 GBq (5 Ci).

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador y público, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de fuentes gamma y de neutrones industriales, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

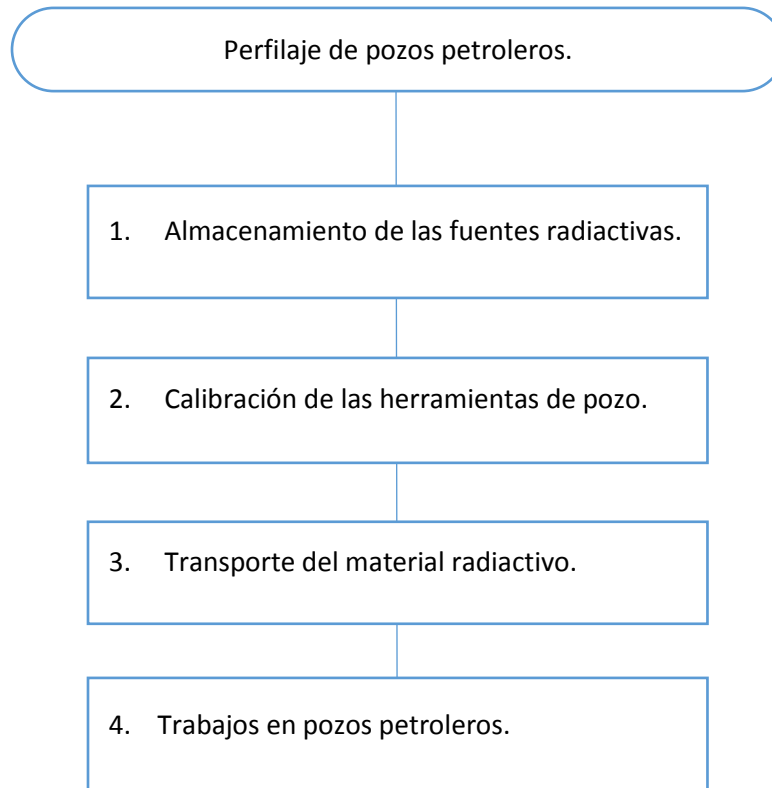
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica relacionada con "Perfilaje de pozos petroleros".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA CON PERFILAJE DE POZOS

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Almacenamiento de las fuentes radiactivas.	1.1 Error humano a calcular el blindaje del almacén con consecuencias para el trabajador.	TOE
	1.2 Entrada no autorizada del público al almacén.	Público
	1.3 Incendio en el almacén.	
2. Calibración de las herramientas de pozo.	2.1 Error en el factor de calibración del detector.	TOE
	2.2 Determinación incorrecta del coeficiente de corrección por el tiempo efectivo de irradiación.	TOE
	2.3 Error al utilizar el certificado de calibración.	TOE
3. Transporte del material radiactivo.	3.1 Caída del equipo por accidente de tránsito.	Público
	3.2 Hurto del vehículo de transporte.	Público
	3.3 Error humano por manipulación del equipo en condiciones inseguras en el vehículo de transporte.	TOE
4. Trabajos en pozos petroleros.	4.1 Error humano a retraer completamente la fuente.	TOE
	4.2 Error humano en la ejecución del plan de emergencia.	Público

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y

evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA CON PERFILAJE DE POZOS

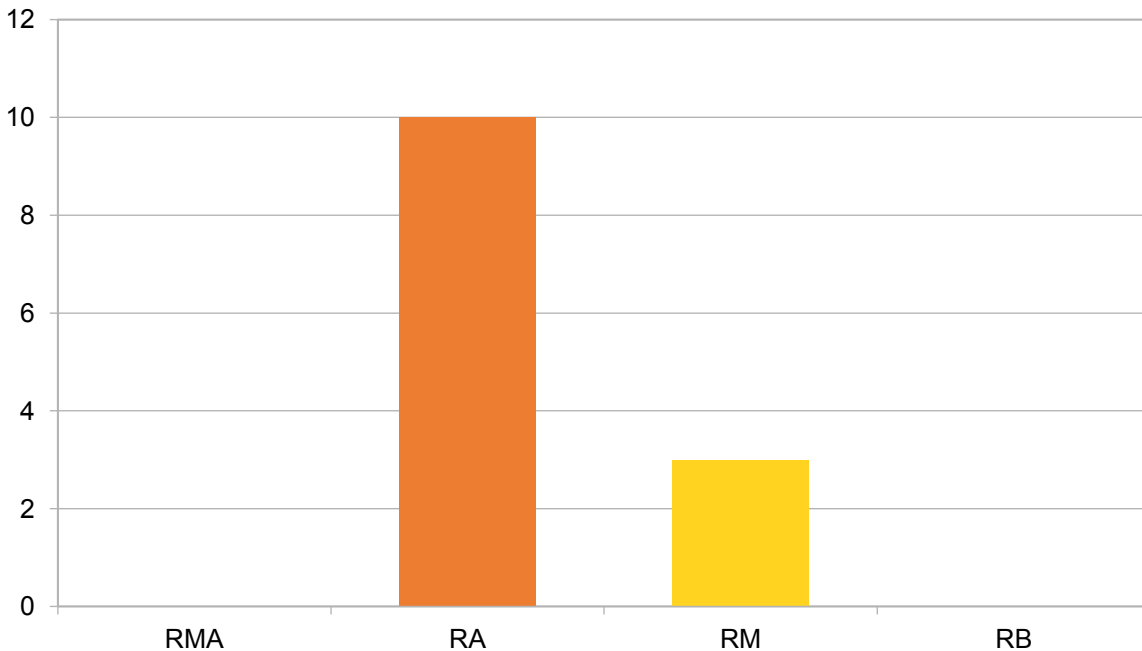
Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	1.3	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
2	2.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.2	$f_B$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
	2.3	$f_B$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
3	3.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
	3.2	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$
	3.3	$f_B$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_M$	$C_M$	$P_A$	$R_A$
	4.2	$f_B$	$C_{MA}$	$P_A$	$R_A$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según sus niveles de riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>11</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	7
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	4
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=5$  min, a una distancia de 5 m, factor de atenuación asociado al blindaje,  $Pb = 1 \times 10^{-5}$

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{185 \times 10^9 \text{ Bq} \cdot 1.032 \times 10^{-4}}{(5\text{m})^2} \cdot 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 5 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 1.27 \times 10^{-6} \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$1.27 \times 10^{-6} \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{1.27 \times 10^{-6}}{20} = 6.35 \times 10^{-6}$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera una práctica aceptable.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica evaluar.

### Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad.

Tiempo de exposición, t=10min, a una distancia de 3 m

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(3\text{m})^2} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 10 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 3771 \text{ mSv} = 3.771 \text{ Sv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el público

$$3.771 \frac{\text{Sv}}{\text{año}} \gg 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3771}{20} = 188.55$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.



## 9.7. ANEXO 7: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON GAMMAGRAFÍA INDUSTRIAL MÓVIL

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará fuentes de Ir-192 con una actividad nominal de 5.5TBq (150 Ci).

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador y público, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de fuentes gamma y de neutrones industriales, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

### Evaluación de la seguridad

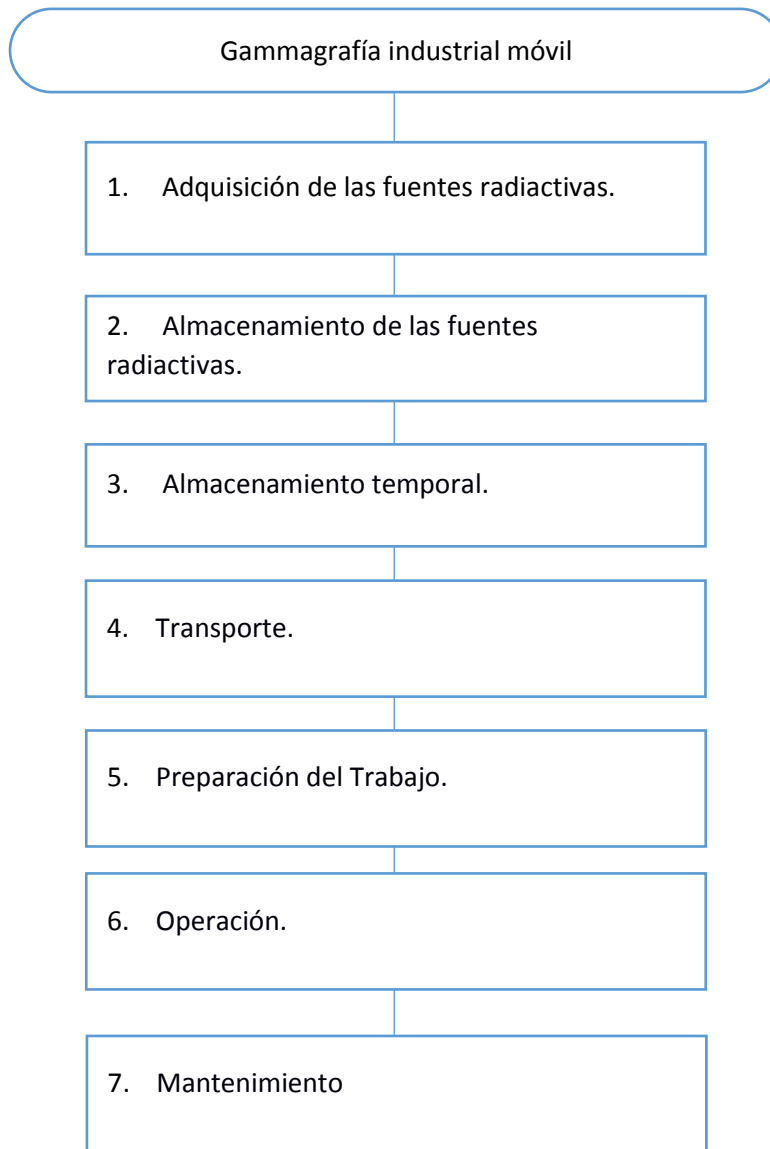
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica relacionada con "Gammagrafía industrial móvil".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE GAMMAGRAFÍA INDUSTRIAL MÓVIL

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Adquisición de las fuentes radiactivas.	1.1 Error humano del encargado en el pedido del equipo.	TOE
	1.2 Error humano del encargado en el pedido de la fuente.	
	1.3 Pérdida de la fuente, por error humano, en el proceso de envío/devolución entre el remitente y el destinatario.	Público
2. Almacenamiento	2.1 Entrada no autorizada del público al almacén.	Público
	2.2 Entrada no autorizada a hurtar el material radiactivo del almacén.	
	2.3 Error humano a elegir accesorios.	TOE
3. Almacenamiento temporal	3.1 Entrada no autorizada del público al almacén.	Público
	3.2 Daño provocado por un evento externo.	
	3.3 Error humano a ubicar el almacén para el resguardo.	
4. Transporte	4.1 Caída del equipo por accidente de tránsito.	Público
	4.2 Hurto del vehículo de transporte.	
	4.3 Error humano por manipulación del equipo en condiciones inseguras en el vehículo de transporte.	TOE
5. Preparación del Trabajo	5.1 Error humano a evaluar la zona de trabajo.	Público
	5.2 Error humano a conectar el tubo guía.	TOE
	5.3 Falla mecánica del sistema de acoplamiento del telemando.	
6. Operación	6.1 Falla mecánica de la cápsula de la fuente.	TOE
	6.2 Atasco del porta fuente por	

	error humano a colocar oportunamente los tapones.	
	6.3 Error humano a resguardar el equipo.	Público
7. Mantenimiento	7.1 Error humano por manipulación insegura del contenedor de trabajo provocando la caída inadvertida de la fuente.	Público
	7.2 Error humano durante el mantenimiento de los sistemas de bloqueo, que provoca la salida inadvertida de la fuente.	TOE
	7.3 Error humano por manipulación insegura del contenedor de trabajo durante la prueba de hermeticidad.	

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables  $f$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $R$  tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA DE GAMMAGRAFÍA INDUSTRIAL MÓVIL

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_B$	$P_A$	$C_M$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$P_A$	$C_M$	$R_M$
	1.3	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
2	2.1	$f_B$	$P_A$	$C_M$	$R_M$
	2.2	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
	2.3	$f_M$	$P_A$	$C_A$	$R_A$
3	3.1	$f_M$	$P_A$	$C_M$	$R_A$
	3.2	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
	3.3	$f_B$	$P_A$	$C_M$	$R_M$
4	4.1	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
	4.2	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
	4.3	$f_B$	$P_A$	$C_A$	$R_A$
5	5.1	$f_M$	$P_A$	$C_M$	$R_A$
	5.2	$f_M$	$P_A$	$C_A$	$R_A$
	5.3	$f_{MB}$	$P_A$	$C_A$	$R_A$

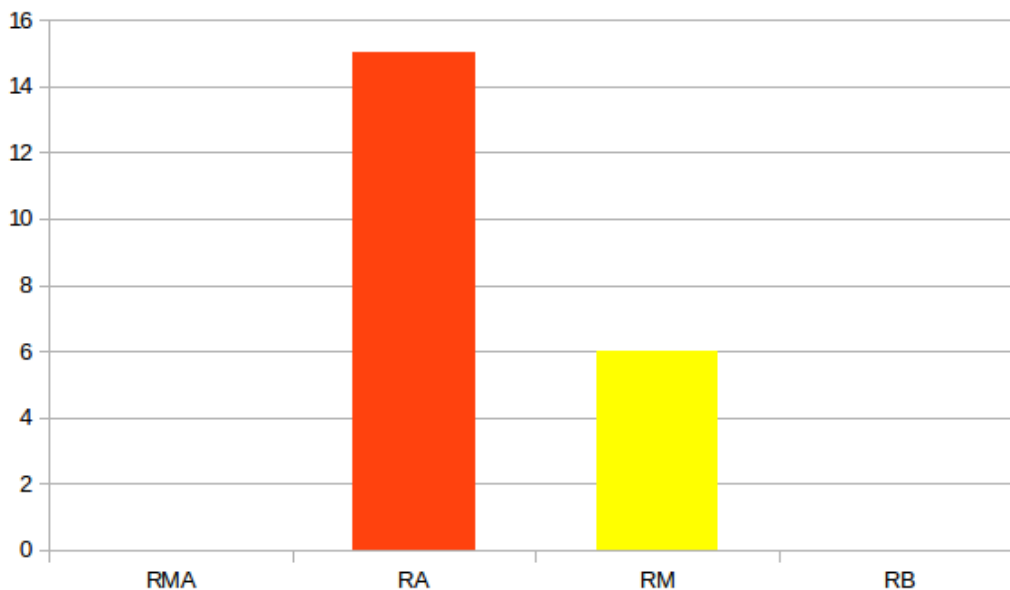
6	6.1	$f_B$	$P_A$	$C_M$	$R_M$
	6.2	$f_B$	$P_A$	$C_A$	$R_A$
	6.3	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
7	7.1	$f_B$	$P_A$	$C_{MA}$	$R_A$
	7.2	$f_B$	$P_A$	$C_A$	$R_A$
	7.3	$f_B$	$P_A$	$C_M$	$R_M$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “Riesgo (R)” de la cantidad de sucesos iniciadores según sus niveles de riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>21</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	15
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	6
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o

reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=10$  seg, a una distancia de 5 m

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{5.5 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 1.559 \times 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 10 \text{ seg} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ seg}}}{(5 \text{ m})^2}$$
$$D_{\text{por exposición}} = 1.14 \text{ mSv}$$

$$D_{\text{anual}} = 1.14 \text{ mSv} \times 90 \text{ proyecciones/año}$$
$$D_{\text{anual}} = 102.6$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$102.6 \frac{\text{mSv}}{\text{año}} > 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{102.6}{20} = 5.13$$

El nivel de riesgo es alto según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo., por lo tanto, la práctica deberá optimizarse.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica evaluar.

## Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad.

Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de 10 cm

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{5.5 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 1.559 \times 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 10 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}}{(0.10 \text{ m})^2}$$

$$D = 714542 \text{ mSv} = 714 \text{ Sv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el público

$$714 \frac{\text{Sv}}{\text{año}} \gg 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{714}{20} = 35.7$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.

## Recursos adicionales

Software gratuito para realizar la evaluación de riesgo, elaborado por el Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares.

Haga clic acá <http://www.foroiberam.org/web/guest/matriz-de-riesgo-ri>

## 9.8. ANEXO 8: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON DIAGNOSTICO EN MEDICINA NUCLEAR

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará fuentes de I-131.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de teleterapia, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

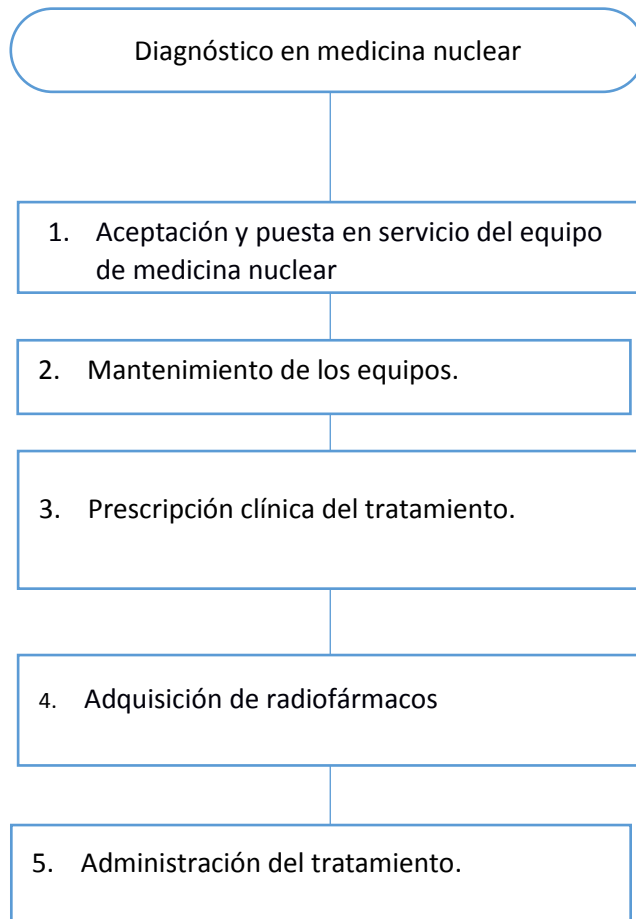
### Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.



Figura A - Etapas para la práctica de "diagnóstico en medicina nuclear".



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE DIAGNÓSTICO EN MEDICINA NUCLEAR

<b>Etapa</b>	<b>Suceso iniciador (SI)</b>	<b>Personas afectadas</b>
1. Aceptación y puesta en servicio del equipo de medicina nuclear.	1.1 Error al registrar los resultados de las mediciones realizadas durante la puesta en servicio para ser introducidas al sistema de planificación del tratamiento.	Paciente
	1.2 Generar de forma incorrecta las tablas con datos para planificación del tratamiento que se utilizan en planificaciones manuales.	
2. Mantenimiento de los equipos.	2.1 Modificación errónea de parámetros críticos del equipo al hacer una reparación.	Paciente
	2.2 Radiofármaco sin blindaje cuando un trabajador se mantiene dentro de la sala de tratamiento mientras se realizan tareas de mantenimiento del equipo.	TOE
3. Prescripción clínica del tratamiento.	3.1 Omitir en la hoja de tratamiento órganos de riesgo definidos durante la prescripción clínica del tratamiento.	Paciente
	3.2 Registrar en la hoja de tratamiento un valor de dosis total que no coincide con la prescripción.	
4. Adquisición de radiofármacos	4.1 Error humano del encargado en el pedido del radiofármaco.	TOE, Público
	4.2 Pérdida del radiofármaco, por error humano, en el proceso de envío/devolución entre el remitente y el destinatario.	TOE, Público

5. Administración del tratamiento.	5.1 Selección errónea, en el panel de control del equipo, de parámetros diferente de lo prescrito en la planilla de tratamiento.	Paciente
	5.2 Fallo de equipo con movimiento indeseado de la mesa del paciente.	Paciente

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables  $f$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $R$  tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA DIAGNÓSTICO EN MEDICINA NUCLEAR

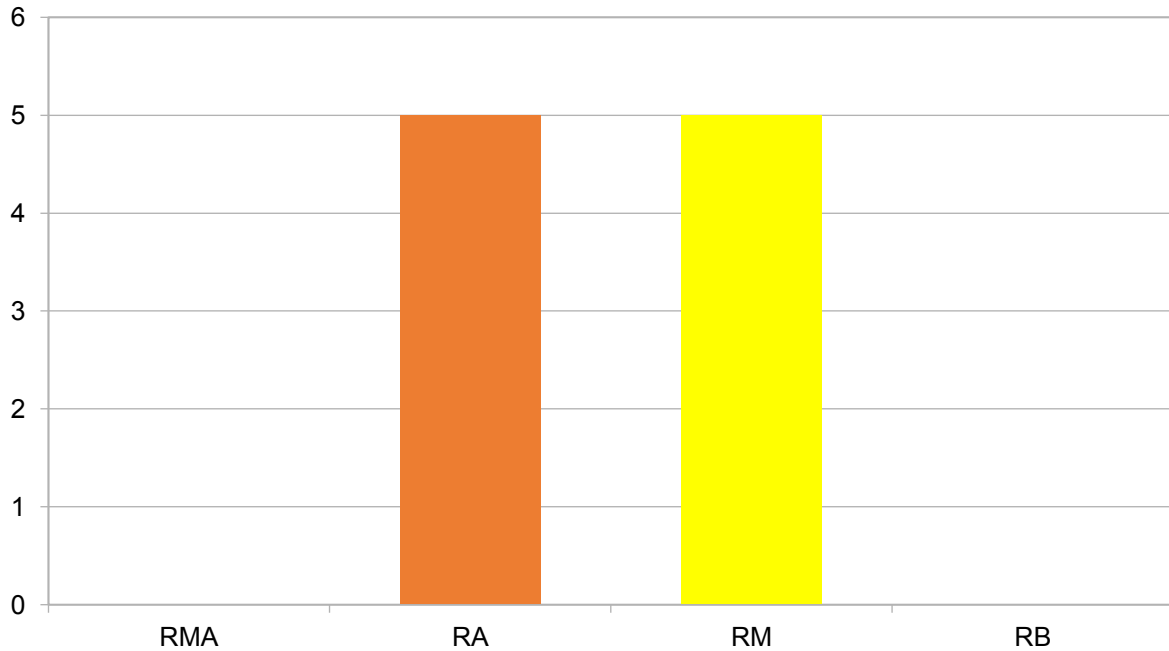
Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	1.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
3	3.1	$f_M$	$C_A$	$P_{MB}$	$R_M$
	3.2	$f_M$	$C_A$	$P_B$	$R_A$
4	4.1	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	4.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
5	5.1	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_A$
	5.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “Riesgo (R)” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>10</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	5
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	5
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

### Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

#### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de  $d=3\text{ m}$ , factor de atenuación asociado al blindaje,  $Pb = 1 \times 10^{-7}$

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(3\text{ m})^2} \cdot 1 \times 10^{-7} \frac{\text{ mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 10 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 0.0037mSv$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto. Se asume que esta exposición es para el tratamiento de 40 pacientes diarios, durante la semana laboral, considerando 50 semanas efectivas al año, esto es equivalente a 10000 exposiciones por año.

$$D = 0.0013577mSv \times \frac{10000 \text{ veces}}{\text{año}} = 3.77 \frac{mSv}{\text{año}}$$

$$3.77 \frac{mSv}{\text{año}} < 20 \frac{mSv}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3.77}{20} = 0.1885$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera una práctica aceptable.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Proceso de recambio ineficiente dejando el cabezal abierto con la fuente expuesta: fractura en el blindaje. Detector mal calibrado.

Tiempo de exposición,  $t=30\text{min}$ , a una distancia de 50 cm

$$D = \frac{A\Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{550 \times 10^{12} Bq \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(0.5m)^2} \cdot 1 \times 10^{-3} \frac{mSv m^2}{10^6 Bq hr} \cdot 30 \text{ min} \frac{1 hr}{60 \text{ min}}$$

$$D = 407.3mSv = 0.4073Sv$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto. Se asume que esta exposición es para el trabajador técnico que realiza el recambio de fuente en el cabezal, esta persona es un TOE. Se asume que la frecuencia de este evento es una vez cada 5 años.

$$407.3 \frac{mSv}{año} \gg 20 \frac{mSv}{año}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{407.3}{20} = 20.37$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.

## 9.9. ANEXO 9: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON ACELERADORES LINEALES

Para realizar la Evaluación de Seguridad en instalaciones y actividades relacionadas con aceleradores lineales, deberá elaborarla un físico médico utilizando los documentos que aparecen en la sección de Bibliografía:

[2] IAEA-TECDOC-1685/S. *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia. Texto Principal y Apéndices.*

[4] *Análisis Probabilista de Seguridad de Tratamientos de Radioterapia con Acelerador Lineal.* Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares.

Así como otros documentos que se consideren complementarios.

Software gratuito para realizar la evaluación de riesgo:

Haga clic acá - <http://www.foroiberam.org/sevrra>



## 9.10. ANEXO 10: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON RAYOS X MEDICOS

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará equipos generadores de rayos X médicos convencionales.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de rayos X médicos convencionales, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

### Evaluación de la seguridad

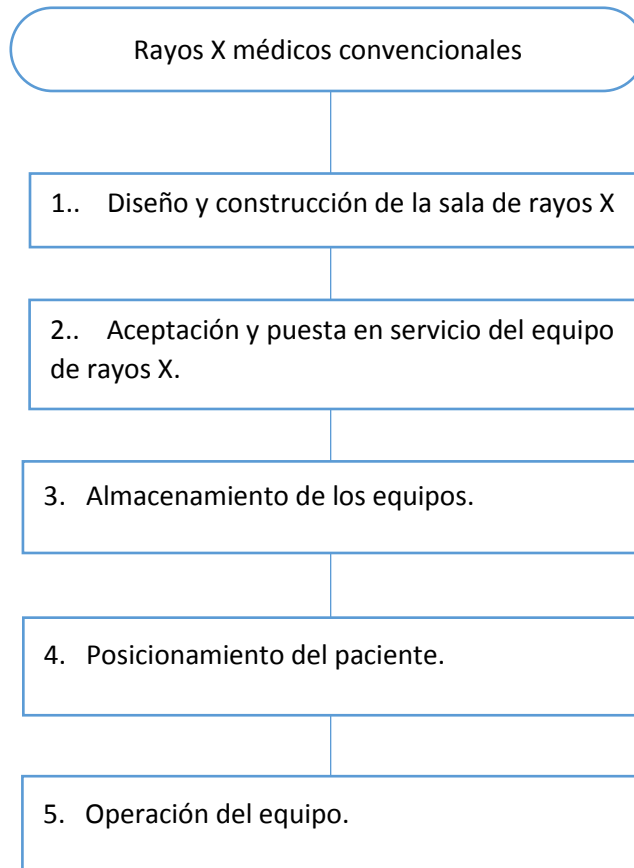
Para realizar la evaluación de seguridad se tomará el enfoque: Cualitativo. En esta práctica no se realizará el enfoque cuantitativo porque no se está considerando una fuente radiactiva dentro del presente análisis.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "rayos X médicos convencionales".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE RAYOS X MEDICOS CONVENCIONALES

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Personas afectadas
1. Diseño y construcción	1.1 Error en el cálculo del blindaje de la sala de rayos X con consecuencias para el personal	TOE, Publico
	1.2 Errores de construcción de la sala de rayos X.	
2. Aceptación y puesta en servicio del equipo de rayos X.	2.1 Cometer un error con los parámetros geométricos del haz de radiación.	Paciente
3. Almacenamiento de los equipos.	3.1 Hurto del equipo desde la sala de rayos X.	Publico
4. Posicionamiento del paciente.	11.2 Intentar la colocación erróneamente al paciente en la mesa de tratamiento durante el posicionamiento.	Paciente
5. Operación del equipo.	5.1 Fallo del temporizador (mecánico) del panel de control que provoca que el equipo continúe irradiando.	Paciente, TOE

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA RAYOS X MEDICOS CONVENCIONALES

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$

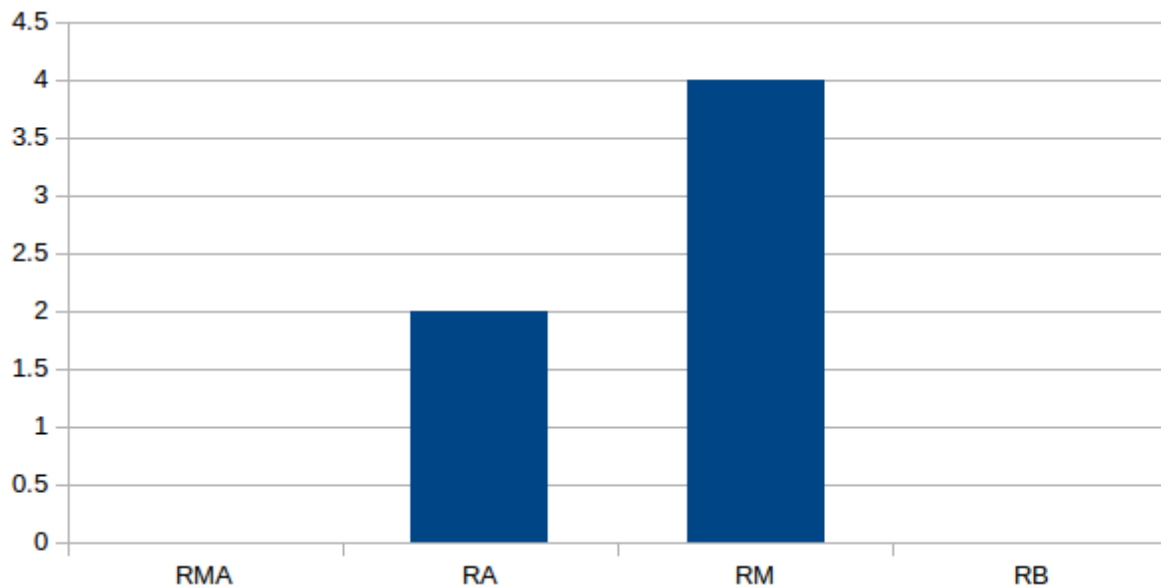
3	3.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_M$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
5	5.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>6</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	2
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	4
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## 9.11. ANEXO 11: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON RAYOS X DENTALES PERIAPICALES

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará equipos generadores de rayos X dentales periapicales.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de rayos X médicos convencionales, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

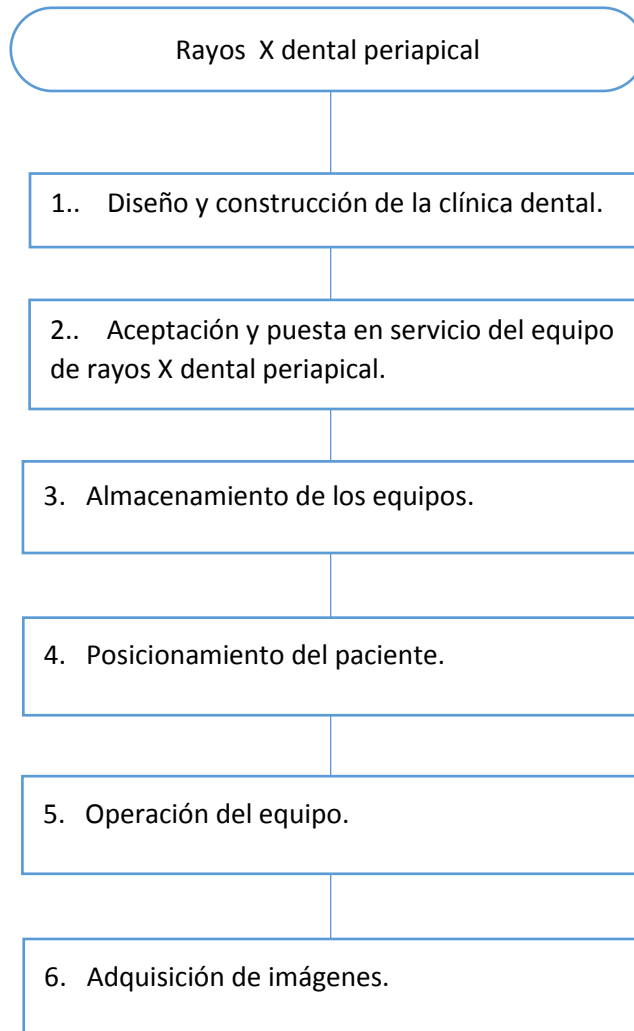
Para realizar la evaluación de seguridad se tomará el enfoque: Cualitativo. En esta práctica no se realizará el enfoque cuantitativo porque no se está considerando una fuente radiactiva dentro del presente análisis.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "rayos X dental periapical".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE RAYOS X DENTAL PERIAPICAL

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Personas afectadas
1. Diseño y construcción	1.1 Error en el cálculo del blindaje de la clínica dental con consecuencias para el personal	TOE, Publico
	1.2 Errores de construcción de la clínica dental.	
2. Aceptación y puesta en servicio del equipo de rayos X.	2.1 Cometer un error con los parámetros geométricos del haz de radiación.	Paciente
3. Almacenamiento de los equipos.	3.1 Hurto del equipo desde la clínica dental.	Publico
4. Posicionamiento del paciente.	11.2 Intentar la colocación erróneamente al paciente en la mesa de tratamiento durante el posicionamiento.	Paciente
5. Operación del equipo.	5.1 Fallo del temporizador (mecánico) del panel de control que provoca que el equipo continúe irradiando.	Paciente, TOE
6. Adquisición de imágenes	6.1 Errores en la obtención de las imágenes.	Paciente

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA DE RAYOS X DENTAL PERIAPICAL

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$

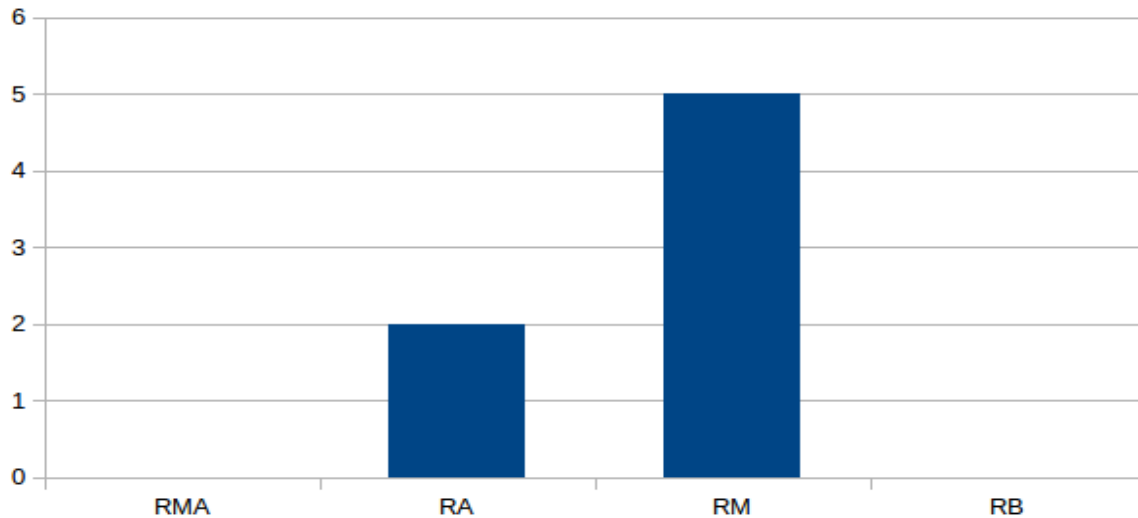
3	3.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_M$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
5	5.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
6	6.1	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>7</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	2
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	5
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.



## 9.12. ANEXO 12: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON EQUIPO DE MAMOGRAFIA

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará equipos de mamografía.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de rayos X médicos convencionales, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

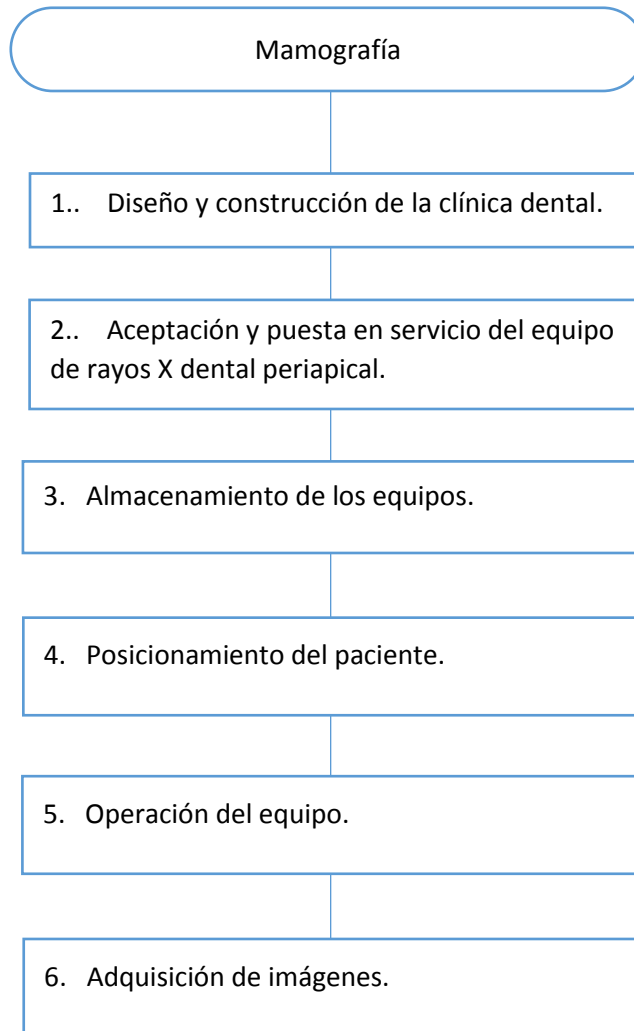
Para realizar la evaluación de seguridad se tomará el enfoque: Cualitativo. En esta práctica no se realizará el enfoque cuantitativo porque no se está considerando una fuente radiactiva dentro del presente análisis.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "mamografía".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE MAMOGRAFIA

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Personas afectadas
1. Diseño y construcción	1.1 Error en el cálculo del blindaje de la clínica con consecuencias para el personal	TOE, Publico
	1.2 Errores de construcción de la clínica.	
2. Aceptación y puesta en servicio del equipo de rayos X.	2.1 Cometer un error con los parámetros geométricos del haz de radiación.	Paciente
3. Almacenamiento de los equipos.	3.1 Hurto del equipo desde la clínica.	Publico
4. Posicionamiento del paciente.	11.2 Intentar la colocación erróneamente al paciente en la mesa de tratamiento durante el posicionamiento.	Paciente
5. Operación del equipo.	5.1 Fallo del temporizador (mecánico) del panel de control que provoca que el equipo continúe irradiando.	Paciente, TOE
6. Adquisición de imágenes	6.1 Errores en la obtención de las imágenes.	Paciente

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA DE MAMOGRAFIA

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$

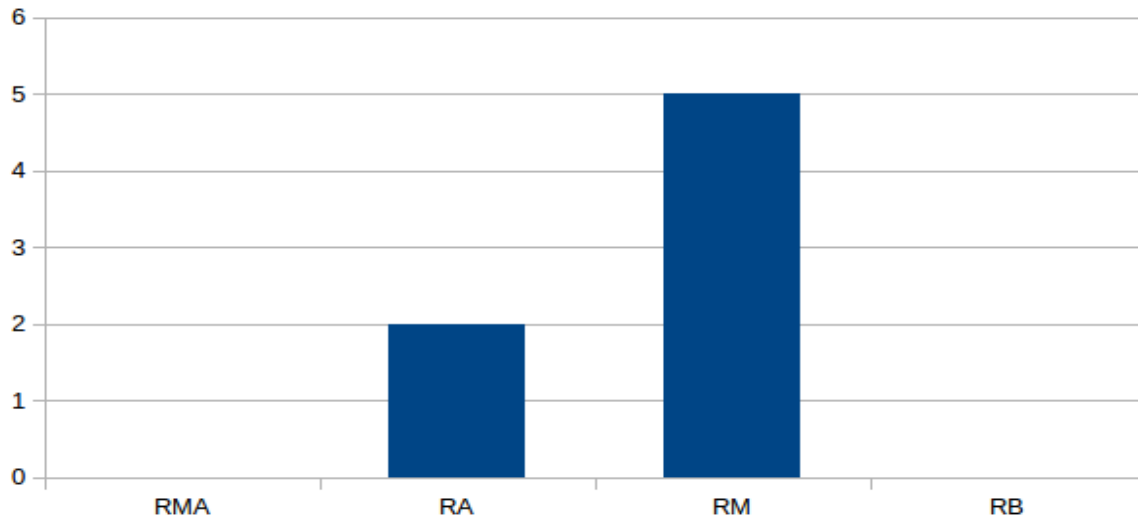
3	3.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_M$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
5	5.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
6	6.1	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>7</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	2
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	5
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## 9.13. ANEXO 13: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON DENSITOMETRIA OSEA

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. utilizará equipos de densitometría ósea.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador, público y pacientes, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la práctica de densitometría ósea, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

## Evaluación de la seguridad

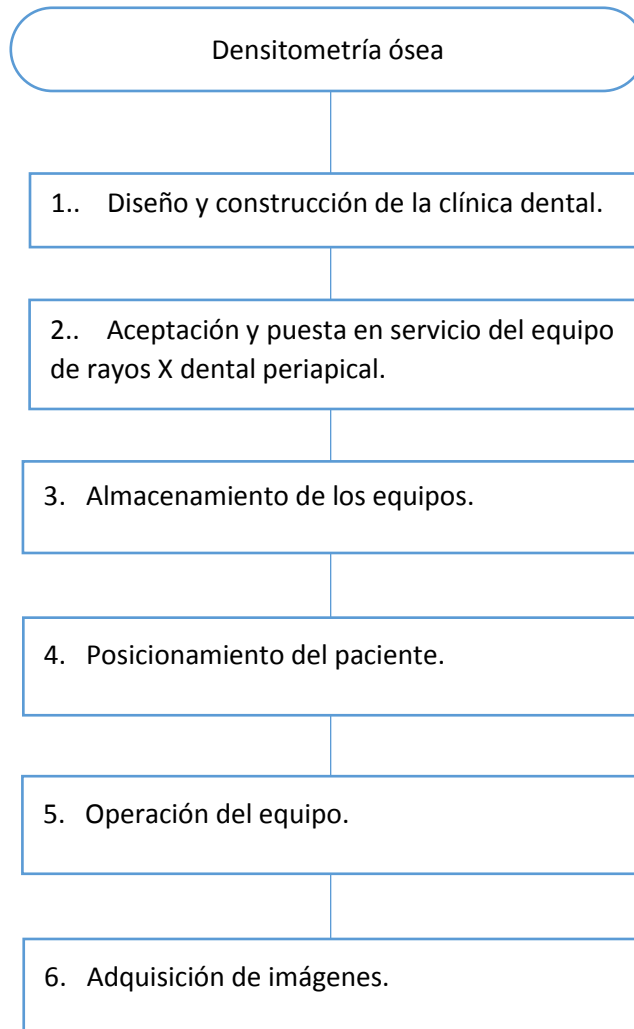
Para realizar la evaluación de seguridad se tomara el enfoque: Cualitativo. En esta práctica no se realizara el enfoque cuantitativo porque no se está considerando una fuente radiactiva dentro del presente análisis.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica de "densitometría ósea".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA DE DENSITOMETRIA OSEA

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Personas afectadas
1. Diseño y construcción	1.1 Error en el cálculo del blindaje de la clínica con consecuencias para el personal	TOE, Publico
	1.2 Errores de construcción de la clínica.	
2. Aceptación y puesta en servicio del equipo de rayos X.	2.1 Cometer un error con los parámetros geométricos del haz de radiación.	Paciente
3. Almacenamiento de los equipos.	3.1 Hurto del equipo desde la clinica.	Publico
4. Posicionamiento del paciente.	11.2 Intentar la colocación erróneamente al paciente en la mesa de tratamiento durante el posicionamiento.	Paciente
5. Operación del equipo.	5.1 Fallo del temporizador (mecánico) del panel de control que provoca que el equipo continúe irradiando.	Paciente, TOE
6. Adquisición de imágenes	6.1 Errores en la obtención de las imágenes.	Paciente

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA DE DENSITOMETRIA OSEA

Etapa	Suceso iniciador (SI)	Frecuencia (f)	Consecuencia (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_{MB}$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
	1.2	$f_B$	$C_M$	$P_A$	$R_M$
2	2.1	$f_B$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$

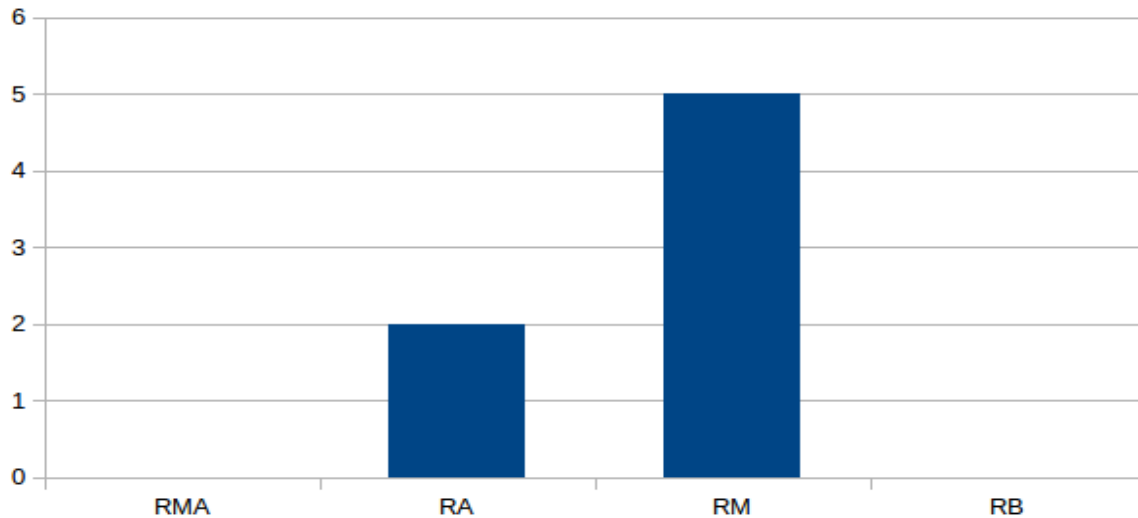
3	3.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
4	4.1	$f_M$	$C_M$	$P_B$	$R_M$
5	5.1	$f_{MB}$	$C_A$	$P_A$	$R_A$
6	6.1	$f_M$	$C_M$	$P_M$	$R_M$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>7</b>
Secuencias con Riesgo Muy Alto ( $R_{MA}$ )	0
Secuencias con Riesgo Alto ( $R_A$ )	2
Secuencias con Riesgo Medio ( $R_M$ )	5
Secuencias con Riesgo Bajo ( $R_B$ )	0

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.



## 9.14. ANEXO 14: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. realizará una práctica relacionada a gestión de desechos radiactivos (fuentes radiactivas, líquidos radiactivos, etc.) en su instalación.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador y público, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones de la gestión de desechos radiactivos, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

### Evaluación de la seguridad

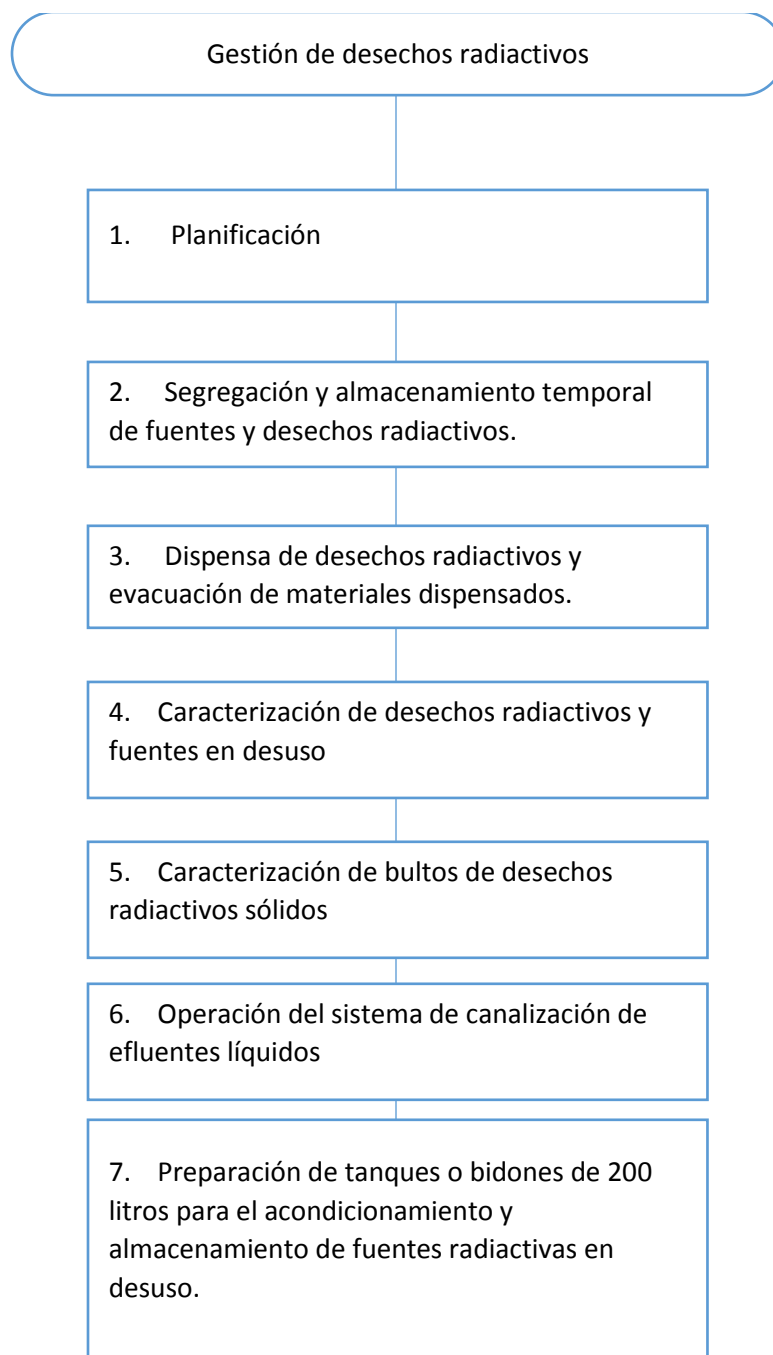
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

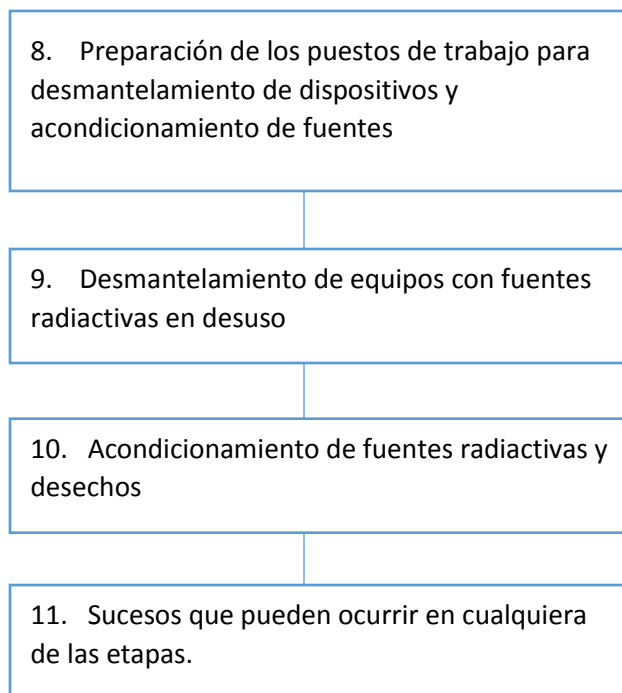
## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica relacionada con "Gestión de Desechos Radiactivos".*





**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA RELACIONADA CON GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

Etapa	Suceso iniciador	Persona(s) afectada(s)
1. Planificación	1.1 Error en el completamiento de los formularios.	TOE, Público
	1.2 Error en el completamiento del Acta de Visita a la Entidad.	
2. Segregación y almacenamiento temporal de fuentes y desechos radiactivos	2.1 Error humano en el cálculo de blindaje del almacén	TOE, Público
	2.2 Intento de entrada no autorizada al almacén y si lo consigue con permanencia	

	prolongada en el lugar donde hay una exposición a radiaciones ionizantes	
	2.3 Incendio en el almacén con daño al equipo y fuentes con dispersión de actividad circunscrito al recinto	
3. Dispensa de desechos radiactivos y evacuación de materiales dispensados.	3.1 Entrada no autorizada del público al almacén	Público
	3.2 Entrada no autorizada a hurtar el material radiactivo del almacén.	Público
	3.3 Error al separar las fuentes en desuso de las restantes.	TOE
4. Caracterización de desechos radiactivos y fuentes en desuso	4.1 Error en los datos de caracterización	TOE
	4.2 Error en la caracterización de desechos radiactivos y/o fuentes radiactivas en desuso equivocadas.	TOE, Público
5. Caracterización de bultos de desechos radiactivos sólidos	5.1 Error en la caracterización del bulto con DR de varios radionúclidos.	Público
	5.2 Error en los valores de decaimiento de los radionúclidos.	TOE, Público
6. Operación del sistema de canalización de efluentes líquidos	6.1 Error en la manipulación de las válvulas (para la descarga directa) cuando se trabaja con material radiactivo.	TOE
	6.2 Incorrecta homogenización del contenido del tanque de retención.	Público
7. Preparación de tanques o bidones de 200 litros para el acondicionamiento y almacenamiento de fuentes radiactivas en desuso	7.1 Error en el blindaje de los tanques, con insuficiente espesor del blindaje.	TOE, Público
	7.2 Error en la densidad del hormigón para la energía de los radionúclidos presentes en el bulto.	TOE
8. Preparación de los puestos de trabajo para desmantelamiento de dispositivos y acondicionamiento de fuentes	8.1 Error humano a evaluar la zona de trabajo para el desmantelamiento de dispositivos y/o acondicionamiento de fuentes.	TOE, Público
	8.2 Errores en las estimaciones de las dosis esperadas para los TOEs.	TOE
9. Desmantelamiento de equipos con fuentes radiactivas en desuso	9.1 Falla en la hermetidad de las fuentes (están deshermetizadas o se deshermetizan durante el desmantelamiento.)	TOE, Público
	9.2 Se rompe(n) parte(s) o pieza(s) del dispositivo o la propia fuente durante el desmantelamiento.	

10. Acondicionamiento de fuentes radiactivas y desechos	10.1 Caída de una capsula con fuentes (aun sin sellar) durante su traslado del PT de llenado al PT de soldadura.	Público
	10.2 Error en la soldadura o cierre de la capsula.	TOE
11. Sucesos que pueden ocurrir en cualquiera de las etapas	11.1 Falla del fluido eléctrico.	TOE, Público
	11.2 Incendio que afecte materiales radiactivos.	
	11.3 Derrames de materiales radiactivos (desechos).	

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador ( $f$ ), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo ( $P$ ), y evaluar las consecuencias del mismo ( $C$ ). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables  $f$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $R$  tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA RELACIONADA CON GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

Etapas	Suceso iniciador	Frecuencia ( $f$ )	Consecuencias ( $C$ )	Probabilidad ( $P$ )	Riesgo ( $R$ )
1.	1.1	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
	1.2	$f_{MB}$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
2.	2.1	$f_M$	$C_M$	$P_A$	$R_A$
	2.2	$f_B$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
	2.3	$f_B$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
3.	3.1	$f_{MB}$	$C_B$	$P_{MB}$	$R_B$
	3.2	$f_{MB}$	$C_B$	$P_{MB}$	$R_B$
	3.3	$f_{MB}$	$C_B$	$P_B$	$R_B$
4.	4.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	4.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
5.	5.1	$f_{MB}$	$C_B$	$P_{MB}$	$R_B$
	5.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_M$	$R_A$
6.	6.1	$f_B$	$C_B$	$P_B$	$R_B$
	6.2	$f_{MB}$	$C_B$	$P_{MB}$	$R_B$
7.	7.1	$f_{MB}$	$C_{MB}$	$P_{MB}$	$R_B$
	7.2	$f_B$	$C_M$	$P_M$	$R_M$
8.	8.1	$f_M$	$C_M$	$P_A$	$R_A$
	8.2	$f_{MB}$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
9.	9.1	$f_M$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
	9.2	$f_{MB}$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
10.	10.1	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$

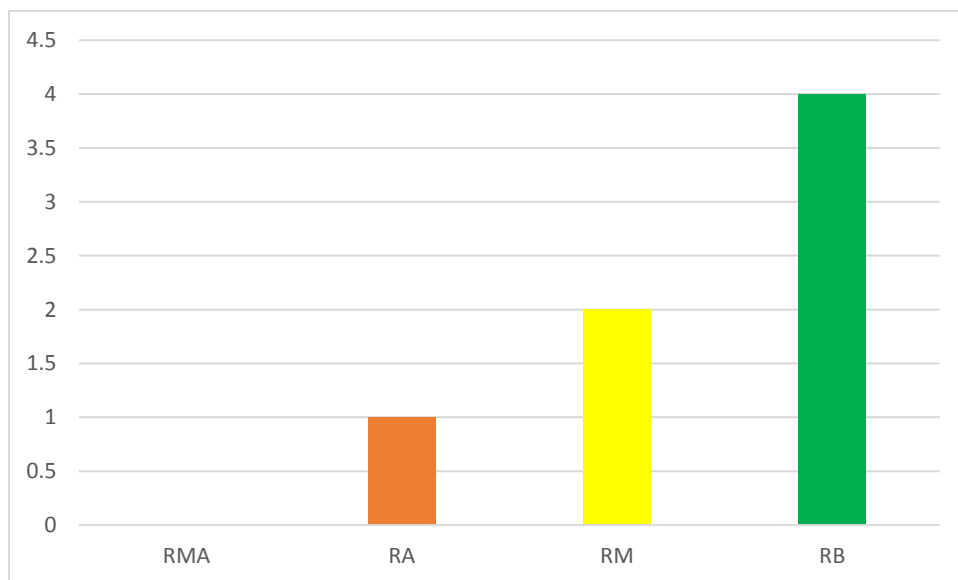
	10.2	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
11.	11.1	$f_M$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
	11.2	$f_B$	$C_A$	$P_M$	$R_A$
	11.3	$f_M$	$C_B$	$P_{MB}$	$R_B$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “Riesgo (R)” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>25</b>
Sucesos con Riesgo Muy Alto (RMA)	0
Sucesos con Riesgo Alto (RA)	5
Sucesos con Riesgo Medio (RM)	4
Sucesos con Riesgo Bajo (RB)	16

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=5$  min, a una distancia de 5 m, factor de atenuación asociado al blindaje,  $Pb = 1 \times 10^{-5}$

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{370 \times 10^9 \text{ Bq} \cdot 1.032 \times 10^{-4}}{(5\text{m})^2} \cdot 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 5 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 1.27 \times 10^{-6} \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$1.27 \times 10^{-6} \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{1.27 \times 10^{-6}}{20} = 6.35 \times 10^{-6}$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera una práctica aceptable.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad.

Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de 3 m

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{Bq hr}} \cdot 10 \text{min} \frac{1 \text{hr}}{60 \text{min}}}{(3\text{m})^2}$$

$$D = 3771 \text{ mSv} = 3.771 \text{ Sv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el público

$$3.771 \frac{\text{Sv}}{\text{año}} \gg 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3771}{20} = 188.55$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.



## 9.15. ANEXO 15: EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN INSTALACIONES Y ACTIVIDADES RELACIONADAS CON ALMACENAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS

Este documento trata sobre la evaluación de la seguridad en la Empresa Ejemplo\_Ideal, S.A. de conformidad con el marco legal y reglamentario vigente.

### DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y/O ACTIVIDAD

Conforme a la Licencia de Operación otorgada por la DGE, la Empresa o institución Ejemplo\_Ideal,S.A. realizará una práctica relacionada a almacenamiento de desechos radiactivos (fuentes radiactivas, líquidos radiactivos, etc.) en su instalación.

### OBJETIVOS FINALES DE LA EVALUACIÓN

Evaluar la seguridad existente en la entidad tanto para el trabajador y público, con vistas a implementar las medidas necesarias para gestionar el riesgo.

### ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

Se consideraron en el estudio las diferentes situaciones del almacenamiento de desechos radiactivos, que podrían dar lugar a exposiciones accidentales, tanto al trabajador como al público.

- Estimación de las dosis esperadas debido a condiciones normales de operación tanto para trabajadores ocupacionalmente expuestos como para el público.
- Consideraciones generales para el cálculo de las dosis recibidas por el trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE).

### Evaluación de la seguridad

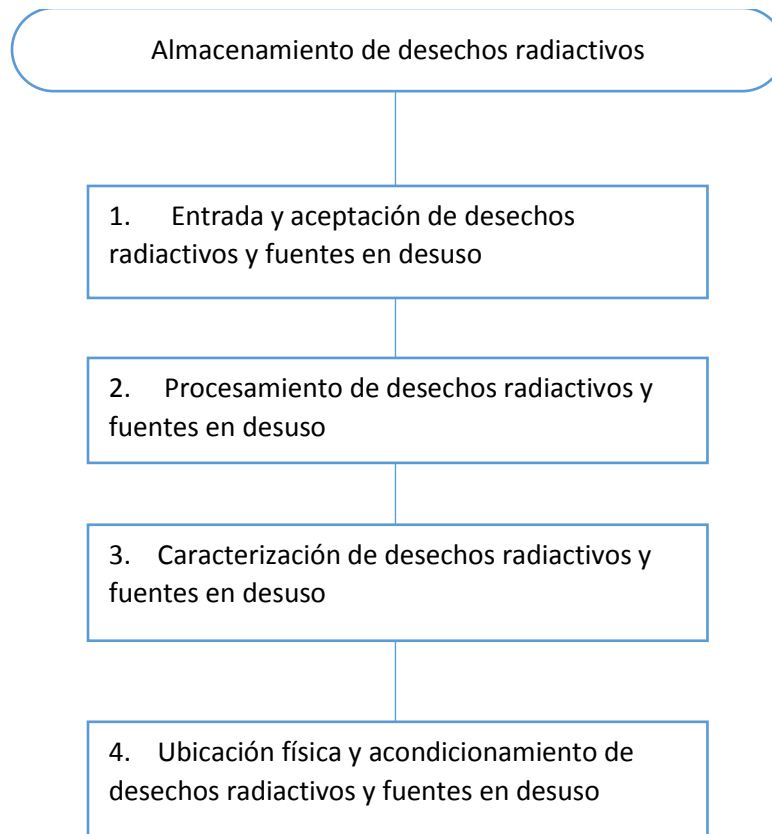
Para realizar la evaluación de seguridad se tomarán dos enfoques: Cualitativo y Cuantitativo.

## Enfoque cualitativo

Para realizar el enfoque cualitativo se seguirá la metodología de la sección 7 del documento principal.

**Paso 1.** Definir las etapas para cada práctica en un flujograma.

*Figura A - Etapas para la práctica relacionada con "Almacenamiento de Desechos Radiactivos".*



**Paso 2.** Para cada etapa de la práctica, generar una lista de sucesos iniciadores de accidentes, indicar quienes son las posibles personas afectadas a los mismos y ordenarlos en una tabla. En una columna se coloca la “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas”. Luego se ordenan en por columna “Etapa”, en otra columna “Suceso Iniciador” y en otra columna “Personas afectadas” tal como se muestra en la Tabla A.

TABLA A. SUCESOS INICIADORES PARA CADA ETAPA DE LA PRÁCTICA RELACIONADA CON ALMACENAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS

Etapa	Suceso iniciador	Persona(s) afectada(s)
1. Entrada y aceptación de desechos radiactivos y fuentes en desuso	1.1 Error en el completamiento de los formularios.	TOE, Público
	1.2 Error en la aceptación de fuentes que tienen actividad mayor a la recomendada.	
2. Procesamiento de desechos radiactivos y fuentes en desuso	2.1 Error en el procesamiento para el tipo de desecho.	TOE, Público
3. Caracterización de desechos radiactivos y fuentes en desuso	4.1 Error en los datos de caracterización	TOE
	4.2 Error en la caracterización de desechos radiactivos y/o fuentes radiactivas en desuso equivocadas.	TOE, Público
4. Ubicación física y acondicionamiento de desechos radiactivos y fuentes en desuso	10.1 Caída de una capsula con fuentes (aun sin sellar) por manipulación incorrecta o avería del equipo o de los estantes.	TOE, Público
	10.2 Acumulación incorrecta de materiales fisibles, modificación de la configuración geométrica, introducción de otras sustancias o supresión de materiales que absorben neutrones o diversas combinaciones de estas circunstancias.	TOE

**Paso 3.** Para todas las etapas y para cada uno de los sucesos iniciadores: evaluar la frecuencia de ese suceso iniciador (f), identificar todas sus barreras y defensas evaluando la probabilidad de fallo (P), y evaluar las consecuencias del mismo (C). Luego se evalúa el riesgo para cada suceso iniciador utilizando la fórmula:  $R = f \times P \times C$ , usando los criterios definidos en la Tabla 2- Matriz de Riesgo de la sección 3. Luego se ordenan las cuatro variables f, P, C, R tal como se muestra en la Tabla B.

TABLA B. MATRIZ DE RIESGO PARA LA PRÁCTICA RELACIONADA CON ALMACENAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS

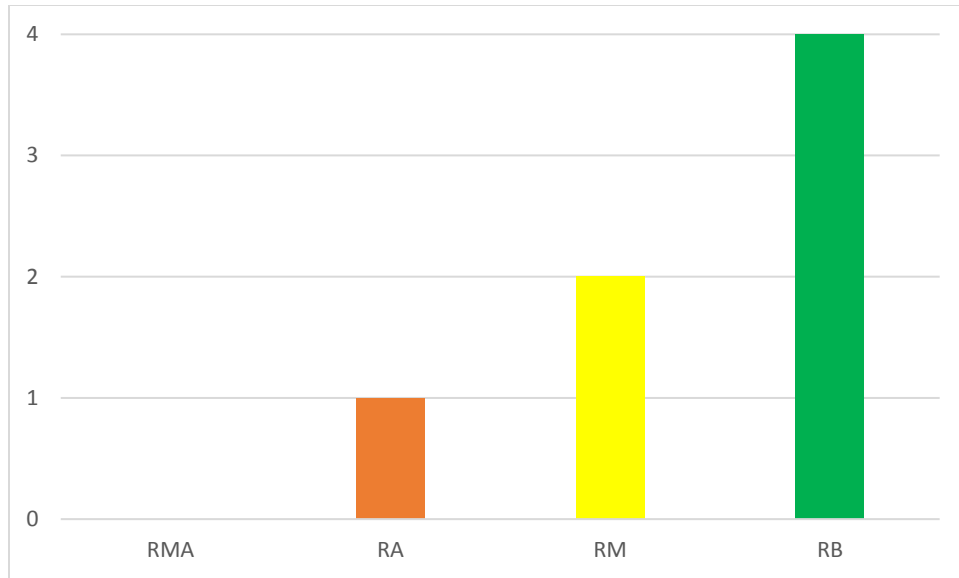
Etapa	Suceso iniciador	Frecuencia (f)	Consecuencias (C)	Probabilidad (P)	Riesgo (R)
1	1.1	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
	1.2	$f_{MB}$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
2	2.1	$f_M$	$C_M$	$P_A$	$R_A$
3	3.1	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_B$	$R_M$
	3.2	$f_{MB}$	$C_{MA}$	$P_{MB}$	$R_M$
4	4.1	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$
	4.2	$f_B$	$C_M$	$P_{MB}$	$R_B$

**Paso 4.** De la Tabla B, se realiza un conteo en la columna “**Riesgo (R)**” de la cantidad de sucesos iniciadores según su riesgo, es decir, se cuentan cuantos sucesos son muy altos, altos, medios y bajos; y conforme a los resultados, se tabulan y puede visualizarse en la Tabla C.

TABLA C. NÚMERO DE SUCESOS INICIADORES IDENTIFICADOS POR NIVELES DE RIESGO

<b>Número de Sucesos Iniciadores Analizados</b>	<b>7</b>
Sucesos con Riesgo Muy Alto (RMA)	0
Sucesos con Riesgo Alto (RA)	1
Sucesos con Riesgo Medio (RM)	2
Sucesos con Riesgo Bajo (RB)	4

**Paso 5.** Los datos de la Tabla C se grafican en un diagrama de barras. En el eje horizontal se colocan, de izquierda a derecha, los niveles de riesgo desde muy alto hasta bajo. En el eje vertical se colocan la cantidad de sucesos iniciadores según su nivel de riesgo.



**Paso 6.** Se toman los sucesos iniciadores con nivel de riesgo muy alto y alto; los sucesos iniciadores de nivel de riesgo medio y bajo se descartan. Se agregan barreras y/o reductores de frecuencia y/o reductores de consecuencias para cada uno de estos sucesos iniciadores hasta llegar a un nivel de riesgo aceptable.

## Enfoque cuantitativo

**Paso 7.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones normales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones de trabajo normales

Tiempo de exposición,  $t=5$  min, a una distancia de 5 m, factor de atenuación asociado al blindaje,  $Pb = 1 \times 10^{-5}$

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$D$  es la dosis,  $A$  es la actividad de la fuente,  $\Gamma$  es el factor gamma del radioisótopo,  $d$  es la distancia entre la fuente y el punto de medición y  $t$  es el tiempo de exposición a la radiación. Se calcula la dosis:

$$D = \frac{370 \times 10^9 \text{ Bq} \cdot 1.032 \times 10^{-4}}{(5 \text{ m})^2} \cdot 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 5 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 1.27 \times 10^{-6} \text{ mSv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el trabajador ocupacionalmente expuesto.

$$1.27 \times 10^{-6} \frac{\text{mSv}}{\text{año}} < 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{1.27 \times 10^{-6}}{20} = 6.35 \times 10^{-6}$$

El nivel de riesgo es bajo según la Tabla I de la sección 1.1, por lo que se considera una práctica aceptable.

**Paso 8.** Se calcula la dosis en un escenario con condiciones potenciales de trabajo para trabajadores ocasionalmente expuestos, público y/o pacientes, según sea la práctica a evaluar.

### Condiciones potenciales

Entrenamiento inadecuado o uso negligente del operador en la instalación y/o durante la actividad.

Tiempo de exposición,  $t=10\text{min}$ , a una distancia de 3 m

$$D = \frac{A \Gamma t}{d^2}$$

$$D = \frac{550 \times 10^{12} \text{ Bq} \cdot 3.703 \times 10^{-4}}{(3 \text{ m})^2} \frac{\text{mSv m}^2}{10^6 \text{ Bq hr}} \cdot 10 \text{ min} \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}}$$

$$D = 3771 \text{ mSv} = 3.771 \text{ Sv}$$

Se verifica ahora si el resultado cumple con el valor establecido en el marco regulador igual a 20mSv/año, mediante comparación para estimar el riesgo para el público

$$3.771 \frac{\text{Sv}}{\text{año}} \gg 20 \frac{\text{mSv}}{\text{año}}$$

El riesgo para esta práctica es

$$R = \frac{3771}{20} = 188.55$$

El riesgo es extremadamente alto (extremadamente peligroso), según la Tabla I de la sección 1.1, la práctica es inaceptable. Deberán implementarse medidas para reducir el riesgo.

**TABLA I – CRITERIO DE RIESGO**

Riesgo	Rango de valores	Nivel de riesgo	Observaciones
R	0–0.5	Bajo	Condiciones aceptables.
	0.5	Medio	Condiciones por mejorar.
	0.5–1	Alto	Aplicar acciones para reducir el riesgo.
	1	Muy alto	Aplicar acciones urgentes para minimizar el riesgo.