



Universidad Nacional de Río Negro

Escuela de Producción, Tecnología y Medio Ambiente

# **Estimación del impacto de una hipotética liberación accidental de material radiactivo considerando contramedidas**

Trabajo Final Integrador para optar por el título de Ingeniero Ambiental

**Alumna:** Nazarena Lavate

**Director:** Dr. Marcelo Caputo

**Co-Director:** Lic. Cristóbal Mulleady

San Carlos de Bariloche, Argentina

Junio 2020

## Contenido

1	Resumen.....	4
2	Introducción .....	5
2.1	Energía nuclear.....	5
2.2	Radiaciones .....	7
2.3	Transporte y dispersión atmosférica.....	8
2.4	Cálculo de dosis.....	11
2.5	Radioprotección y normativa .....	12
2.6	Evaluación del Riesgo Radiológico Individual.....	14
3	Objetivos .....	16
3.1	Objetivos pedagógicos .....	16
3.2	Objetivos técnicos .....	16
4	Herramientas de cálculo .....	17
4.1	Descripción del código WinMACCS .....	17
4.1.1	Fases.....	18
4.1.2	Módulos.....	18
4.1.3	Dosimetría .....	19
4.1.4	Análisis económico.....	20
4.1.5	Datos de entrada.....	21
4.2	Código de cálculo del RRI .....	21
5	Evaluaciones preliminares: Comprendiendo WinMACCS .....	23
5.1	Clase de estabilidad atmosférica.....	23
5.2	Vidas medias .....	25
5.3	Deposición seca.....	25
6	Casos de estudio.....	28
6.1	Hipótesis de cálculo y datos de entrada .....	28
6.1.1	Término fuente.....	28
6.1.2	Información meteorológica.....	30
6.1.3	Población y región de análisis .....	31
7	Resultados .....	32
7.1	Verificación de la Norma AR 10.1.1.....	32
7.2	Análisis de la variación de <i>RRI</i> mediante la aplicación de contramedidas.....	33
7.2.2	Contramedidas aplicadas individualmente .....	36
7.2.3	Contramedidas aplicadas de manera progresiva .....	42
7.3	Análisis económico.....	48
7.3.1	Contramedidas en el largo plazo.....	48

7.3.2	Contramedidas aplicadas individualmente .....	48
7.3.3	Contramedidas aplicadas de manera progresiva .....	49
7.4	Análisis integral .....	50
8	Conclusiones.....	52
9	Trabajos Futuros.....	56
10	Bibliografía .....	57
11	Anexo 1.....	59
12	Anexo 2.....	65

## 1 Resumen

En este trabajo final integrador se analizó el impacto radiológico generado por un hipotético accidente en una central nuclear genérica y el efecto de la implementación de distintas contramedidas. Se utilizó el código WinMACCS para el cálculo de la dispersión atmosférica del material radiactivo liberado y de las dosis resultantes en el público. Este mismo código se utilizó para el cálculo del impacto económico del accidente y de las contramedidas. Además, se desarrolló un código utilizando el lenguaje de programación Python que permitió calcular el Riesgo Radiológico Individual (*RII*) y graficar mediante curvas de nivel el mismo.

En primer término, se analizó el funcionamiento de WinMACCS mediante pruebas sencillas sobre: Clase de Estabilidad Atmosférica de Pasquill, vida media de los radionucleidos y deposición seca. Luego, se diseñó un escenario de accidente hipotético basado en la bibliografía y se comprobó que el mismo cumplía con la normativa argentina Norma AR 3.1.3 (ARN, 2002).

A fin de analizar los efectos de las contramedidas sobre la población se utilizó como figura de mérito el *RII*, y se evaluó para distintos Casos de Estudio la variación del mismo respecto a un escenario en donde no se aplican contramedidas en el corto plazo. Además, para comparar tanto la efectividad de las contramedidas como su costo, se creó el Índice de reducción del *RII*. Este índice representa la inversión realizada por unidad porcentual de  $RII_{máx}$  reducida.

Se definieron ocho Casos en los que se aplicaron distintas contramedidas en el corto plazo, dentro de las que incluyó: refugio, evacuación, relocalización temporal y suministro de pastillas de yoduro de potasio. En algunos Casos se aplicó sólo una de las contramedidas y en todo el dominio, mientras que en otros se aplicaron de manera progresiva y en distintas áreas.

También se consideraron las contramedidas aplicadas en el largo plazo, que incluyen: descarte de productos agrícolas, prohibición temporal de la agricultura, remediación, remediación seguida de interdicción y expropiación de propiedades, pero estas fueron las mismas en todos los Casos.

Los resultados señalaron que todas las contramedidas analizadas generaron disminuciones en el *RII*, pero en distinta magnitud. Al modelar las contramedidas de manera individual se logró cuantificar el efecto de cada acción. Por otro lado, cuando se las aplicó de manera progresiva se consiguió administrar mejor los recursos, tanto económicos como humanos.

Al evaluar los efectos de las contramedidas, la complejidad y los costos de las mismas, se determinó que el Caso más favorable es aquel en el que se refugia y luego evacúa a la población presente dentro de un área circular de 10 km alrededor de la central, se relocaliza a la población fuera de esta área según un límite de dosis efectiva establecido, además se suministran pastillas de KI al 50% de la población (Caso 8). Esta combinación genera una gran disminución del *RII* en toda el área de estudio, con un valor de  $RII_{máx}$  correspondiente al 15% del valor máximo obtenido en el Caso Base, esto es sin contramedidas (Caso 0). Al no tener que evacuar o relocalizar a toda la población, disminuye la complejidad del accionar y también los costos.

## 2 Introducción

### 2.1 Energía nuclear

La energía nuclear es la energía contenida en el núcleo de un átomo. Puede utilizarse para la generación de electricidad, pero primero debe ser liberada. Esta energía se puede obtener de dos formas: fusión nuclear y fisión nuclear. Nos centraremos en la fisión, ya que es el proceso por el cual las centrales nucleares producen electricidad.

En la fisión de  $^{235}\text{U}$ , por ejemplo, el núcleo de uranio es excitado por la captura de un neutrón y se divide en dos núcleos más ligeros, llamados productos de fisión. Dependiendo de la reacción particular, también se liberan entre uno y tres neutrones, rayos gamma y grandes cantidades de energía (Tipler y Llewellyn, 2012).

La fuerza de repulsión de Coulomb separa los productos de fisión, dándoles energías cinéticas muy altas. Como resultado de colisiones con otros átomos, esta energía se transforma eventualmente en energía térmica. Además, los neutrones emitidos pueden incidir sobre otros núcleos fisionables iniciando nuevas reacciones de fisión que, a su vez, generan más neutrones, produciendo así una reacción en cadena (Tipler y Llewellyn, 2012). En la Figura 1 puede verse una representación gráfica de este proceso.

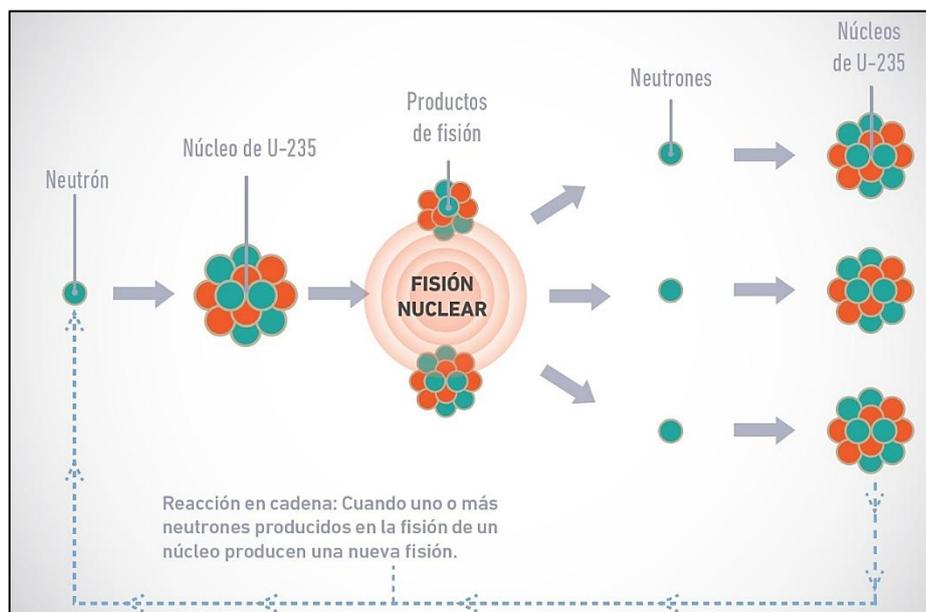


Figura 1. Representación esquemática de la fisión nuclear (CNEA, 2017).

Una central nuclear es una instalación industrial en la que se produce electricidad a partir de la energía térmica liberada mediante reacciones de fisión en el núcleo de un reactor nuclear. La energía térmica liberada, ya sea mediante un ciclo directo o indirecto, se utiliza para calentar agua hasta convertirla en vapor a alta presión y temperatura. Este vapor hace girar una turbina que está conectada a un generador que transforma la energía mecánica del giro de la turbina en energía eléctrica (Consejo de Seguridad Nuclear de España, 2015).

Argentina cuenta actualmente con tres centrales nucleares de generación eléctrica en operación y una en etapa de construcción. Las centrales Atucha I, Atucha II y CAREM25 (en construcción) forman parte del Complejo Nuclear Atucha ubicado en la localidad de Lima, provincia de Buenos Aires. La central de Embalse se encuentra en la costa sur del Embalse de Río Tercero, provincia de Córdoba.

Las centrales nucleares en operación no emiten prácticamente gases contaminantes, por ejemplo, CO<sub>2</sub>, ni material particulado, ni radiactivo significativo. Sus residuos (material radiactivo) quedan confinados en el mismo combustible que es un material cerámico (pastillas de UO<sub>2</sub>) y recubiertas por vainas metálicas. Solo es posible liberarlos en caso de accidentes graves en donde dichos elementos alcanzan temperaturas muy elevadas y se produce la fusión del núcleo. Debido a este potencial –extremadamente bajo- de liberar radionucleidos a la atmósfera en caso de accidente, es necesario evaluar el riesgo radiológico individual para los miembros del público. Esto se realiza en la etapa de diseño para desarrollar planes de emergencia en sus alrededores (IAEA, 1986).

Durante un accidente severo con falla en la contención pueden liberarse a la atmósfera gases y aerosoles radiactivos. Esta liberación se denomina *término fuente*. El término fuente refiere al tipo de material radiactivo, la tasa de liberación de material radiactivo, ubicación de los puntos de liberación, evolución temporal y energía de liberación. Los radionucleidos pueden ser liberados en forma gaseosa, asociados con partículas en el aire, disueltos o suspendidos en agua u otros líquidos (Till y Grogan, 2008). Algunos de los materiales liberados pueden ser contaminantes químicos, pero estos no serán analizados en este trabajo.

Luego de la liberación, el viento transportará el material radiactivo fuera del sitio de la central nuclear. Las poblaciones circundantes se verán eventualmente expuestas a radiaciones, y los terrenos, edificios y cultivos serán eventualmente contaminados por el material radiactivo depositado (Sprung et al., 1990). Esto genera un impacto negativo en el ambiente tanto en aspectos sociales, económicos y sobre los servicios ecosistémicos.

Estimar la severidad y la probabilidad de ocurrencia de efectos a la salud inducidos por la exposición a la radiación ionizante, los costos y las pérdidas resultantes de la contaminación son de importancia para el desarrollo de un plan de respuesta ante una emergencia (Henry y Heinke, 1999).

El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por su sigla en inglés) trabaja con sus Estados Miembros y múltiples asociados de todo el mundo para promover el uso de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física (IAEA, s.f.).

Reglamentar y garantizar la seguridad de las instalaciones nucleares es una responsabilidad nacional. El IAEA ayuda a los Estados Miembros a cumplir esa responsabilidad mediante el establecimiento de recomendaciones de seguridad internacionales y de disposiciones para su aplicación en todo tipo de instalaciones nucleares durante su ciclo de vida útil, desde su diseño hasta su salida de servicio (IAEA, s.f.).

El presente trabajo se realizó en el marco de un proyecto de cooperación técnica con el IAEA. En dicho proyecto se propondrá una metodología basada en el concepto de Riesgo Radiológico Individual para diagramar la zona donde se realiza el planeamiento de contramedidas en caso de un hipotético accidente nuclear con liberación de material radiactivo a la atmósfera.

Se considera como contramedida o acción de mitigación a toda actividad diseñada para reducir la exposición a la radiación, los efectos en la salud y el impacto en el ambiente y la economía. Dentro de estas acciones se puede mencionar la evacuación, el refugio, la relocalización temporal y permanente (definidas en el párrafo siguiente), el suministro de

pastillas de yoduro de potasio, la restricción de la producción y consumo de alimentos, el descarte de cultivos y suelos contaminados, entre otras (Jow et al., 1990).

El refugio es la acción realizada por el público para aprovechar la protección contra la exposición a la radiación que ofrece permanecer dentro de sus hogares y lejos de puertas y ventanas durante y después del paso de la pluma radiactiva. La evacuación comprende el desplazamiento de miembros del público pertenecientes en una zona explícita, en una dirección radial y con una velocidad determinada. La relocalización también implica el desplazamiento del público, pero esta se realiza siguiendo un criterio de dosis y no un criterio espacial como en la evacuación. La relocalización es una acción designada para limitar la exposición a radionucleidos depositados en el suelo y otras superficies y se aplica a los individuos que no evacúan (Jow et al., 1990).

## 2.2 Radiaciones

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por su sigla en inglés) define la radiación como energía en forma de ondas o partículas (electrones, iones, partículas alfa, etc.) viajando a través del espacio (ICRP, 2019b).

Actualmente, se conocen más de 3000 radionucleidos. La gran mayoría son de origen natural y unos pocos son obtenidos artificialmente. De los radionucleidos conocidos, solo hay 257 cuyos estados fundamentales son estables. Todos los demás son radiactivos, es decir, se descomponen en otros radionucleidos emitiendo radiaciones (Tipler y Llewellyn, 2012).

Las principales fuentes de radiación natural provienen del espacio exterior y de los materiales radiactivos naturales presentes en el suelo y las rocas. Por ejemplo, el radón es el radionucleido con mayor presencia en el planeta y es una de las principales fuentes de radiación natural (CNEA, 2018b).

La *radiación ionizante* es la radiación que tiene energía suficiente para romper enlaces químicos y para ionizar átomos. La exposición a estas radiaciones puede dañar las células vivas, causando la muerte en algunas de ellas y modificando otras. La radiación ionizante incluye los rayos-X y rayos- $\gamma$  y además la radiación emitida por partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  y neutrones (ICRP, 2019b).

En promedio, del total de las radiaciones ionizantes que un ser humano recibe anualmente, poco más del 20% es de origen artificial (uso médico y exposición laboral) como se puede observar en la Figura 2.

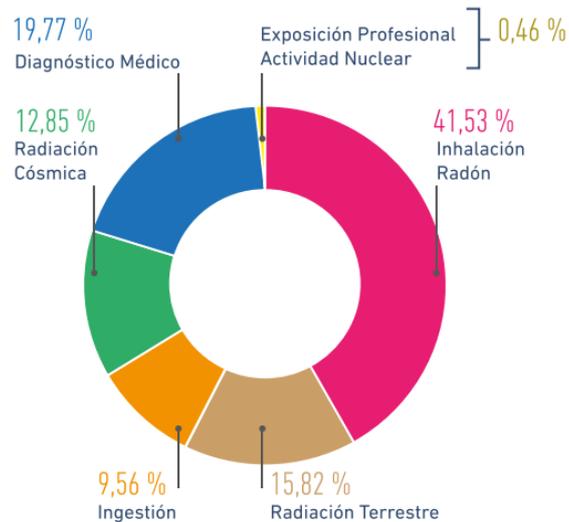


Figura 2. Fuentes de radiación ionizante (CNEA, 2018b).

En protección radiológica, los efectos nocivos de la exposición a la radiación se agrupan en dos categorías: deterministas y estocásticos.

La radiación puede generar el daño y la pérdida de células en órganos y tejidos. Cuando la radiación afecta un número de células es suficientemente grande, genera reacciones nocivas y daños observables en el órgano o tejido. Este tipo de daño ocurre en todas las personas que reciben una dosis superior al umbral de manifestación del mismo y se llama determinista (Till y Grogan, 2008). Por encima de este umbral, cuanto mayor sea la dosis, más severas serán las consecuencias (ICRP, 2019a).

Cuando la radiación modifica el ADN de las células, pero no las mata y no son reparadas correctamente, y conservan además la capacidad de reproducirse, esta alteración se transmite a las células hijas y si el sistema inmunológico no las destruye, puede generar cáncer en el tejido u órgano del individuo expuesto. Si las células dañadas están involucradas en la transmisión de información genética, pueden surgir potenciales trastornos hereditarios, aunque según los estudios epidemiológicos en descendientes de Hiroshima y Nagasaki, estos efectos no han sido detectados. Estos efectos se llaman estocásticos, es decir, de naturaleza aleatoria. Pueden ser generados por el daño de una sola célula, pero, a medida que aumenta la dosis, aumenta la probabilidad de que más células se dañan, incrementando la probabilidad de que los efectos estocásticos ocurran (Till y Grogan, 2008).

### 2.3 Transporte y dispersión atmosférica

Para evaluar las dosis y los impactos de una hipotética liberación accidental es necesario proyectar el transporte y la dispersión atmosférica de los radionucleidos liberados. Esto puede realizarse mediante la implementación de un modelo de dispersión atmosférica (IAEA, 1986). Sin embargo, primero se debe entender la estructura y dinámica de la atmósfera.

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa, relativamente delgada, que envuelve al planeta. Está compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno, con pequeñas cantidades de otros gases, como vapor de agua y dióxido de carbono. La atmósfera no posee un límite superior definido, más bien, se vuelve progresivamente menos densa con la altitud hasta mezclarse con el espacio exterior. Casi el 99% de la atmósfera se encuentra distribuida en los primeros 30 km de altura de la superficie terrestre (Ahrens y Henson, 2016).

Cuando examinamos la atmósfera en su componente vertical, vemos que se puede dividir en una serie de capas. Las fronteras de cada una están marcadas por las variaciones del perfil vertical de temperatura del aire. Según esta clasificación, la región de la atmósfera que comprende desde la superficie hasta unos 11 km sobre la misma, donde el aire deja de enfriarse con la altura, se denomina troposfera. En esta capa se desarrolla la vida y la mayoría de los procesos meteorológicos (Ahrens y Henson, 2016).

La siguiente capa es la estratosfera que se extiende hasta aproximadamente 50 km sobre la superficie terrestre. Entre la troposfera y la estratosfera se encuentra la tropopausa, una capa de transición. La estratosfera contiene la denominada capa de ozono que impide que los dañinos rayos UV lleguen a la Tierra. Le siguen la mesosfera y la termosfera que se extienden hasta 85 km y 120 km respectivamente. La capa de transición entre la estratosfera y la mesosfera se conoce como estratopausa y la que se encuentra entre la mesosfera y la termosfera como mesopausa. Más allá de los 500 km se encuentra la exosfera. En esta capa la densidad de la atmósfera es muy baja y la misma se fusiona con el espacio interplanetario (Ahrens y Henson, 2016). La Figura 3 muestra las capas de la atmósfera.

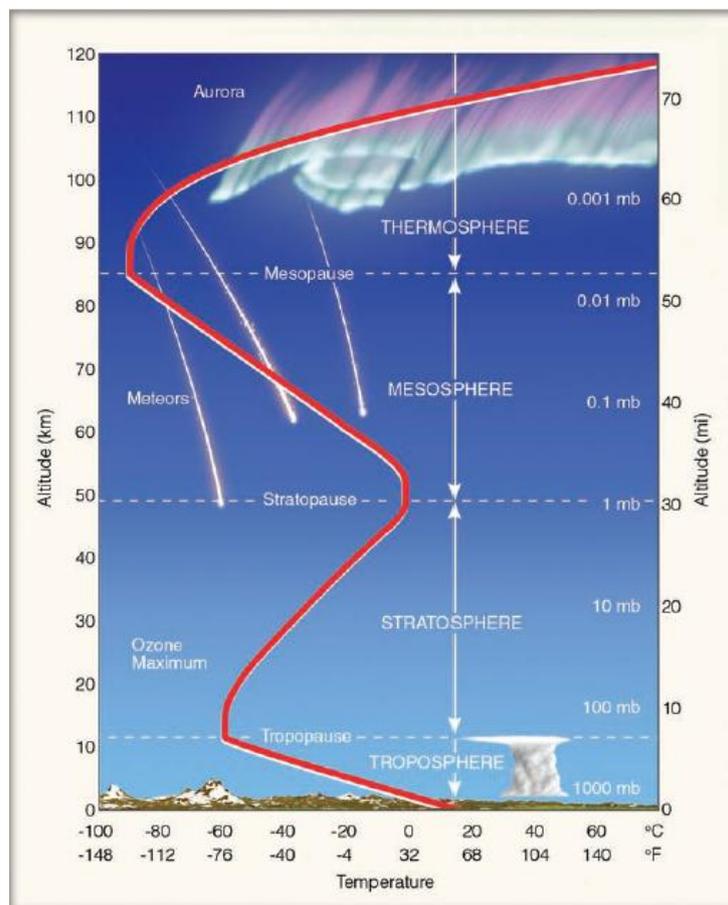


Figura 3. Capas de la atmósfera en relación con el perfil vertical de temperatura del aire (Ahrens y Henson, 2016).

En la Figura 3, la línea roja muestra como varía la temperatura promedio en cada capa respecto a la altura (Ahrens y Henson, 2016).

La mayoría de los fenómenos de contaminación del aire ocurren en la capa más baja de la troposfera denominada Capa Límite Planetaria (CLP). Generalmente la CLP se extiende hasta una altitud cercana a 1000 m sobre la superficie, pero esta altitud puede variar en presencia de

vientos fuertes o terreno irregular (Ahrens y Henson, 2016). El transporte y dispersión de los contaminantes depende de los movimientos y procesos que ocurren en la misma. La CLP se forma como resultado de los intercambios de cantidad de movimiento, calor y humedad entre la atmósfera y la superficie terrestre (Zannetti, 1990). La rugosidad y la topografía de la superficie determinan la fricción o la resistencia que la superficie ejerce sobre la atmósfera y, por lo tanto, el intercambio de cantidad de movimiento. Del mismo modo, el contenido de humedad y las propiedades térmicas y radiativas de la superficie, determinan las características termodinámicas de la CLP y los intercambios de calor y vapor de agua entre la tierra y la atmósfera (Pal Arya, 1999).

Un modelo de dispersión atmosférica implica una relación matemática entre la cantidad o tasa de liberación de efluentes y la distribución de su concentración en la atmósfera. Físicamente, la relación surge a través de las propiedades de los movimientos atmosféricos (viento y turbulencia) que causan la dispersión. Un modelo también puede incluir efectos de otros procesos, además de la difusión, que afectan la concentración, por ejemplo, decaimiento radiactivo y la deposición del material en la superficie (IAEA, 1986).

Existen varios tipos de modelos o enfoques que permiten plasmar los fenómenos de dispersión y transporte atmosférico. El modelo más relevante y utilizado en diversas aplicaciones es el denominado Pluma Gaussiana.

El Modelo de Pluma Gaussiana permite modelar el transporte de contaminantes en la atmósfera, así como también la variación de la concentración de un determinado contaminante en el espacio (Jow et al., 1990).

Dicho modelo representa un estado estacionario al suponer que la tasa de emisión y las condiciones atmosféricas son constantes. La concentración media procedente desde una fuente puntual continua, puede representarse como una pluma cuyas distribuciones de concentración siguen una distribución normal. Esta tiene su punto máximo en el centro de la pluma en todas las distancias y disminuye hacia los bordes (Seinfeld y Pandis, 2006).

La Ecuación 1 permite calcular la concentración integrada en el tiempo con el Modelo de Pluma Gaussiana para una fuente puntual (IAEA, 1986):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

Donde  $C$  es la concentración del contaminante integrada en el tiempo ( $\text{Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $Q$  la tasa de emisión constante ( $\text{Bq}$ ),  $\sigma_y$  la desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección  $y$  (horizontal) ( $\text{m}$ ),  $\sigma_z$  la desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección  $z$  (vertical) ( $\text{m}$ ),  $u$  la velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $H$  la altura efectiva ( $\text{m}$ ) y  $(x, y, z)$  las distancias en direcciones del viento, la horizontal y la vertical respectivamente.

El modelo se orienta de manera tal que la dirección del eje de transporte se alinea con la dirección del viento. Se asume que los contaminantes son dispersados de modo que producen una distribución normal de concentraciones en las direcciones vertical y horizontal. La distribución en la dirección del viento se ignora debido a que las turbulencias asociadas son pequeñas en comparación con la velocidad del viento, es decir que la contribución del transporte prevalece sobre la difusión turbulenta. Además, supone que la velocidad y dirección del viento al momento de la emisión, permanecen constantes en el tiempo (Jow et al., 1990). La Figura 4 muestra de manera esquemática lo mencionado.

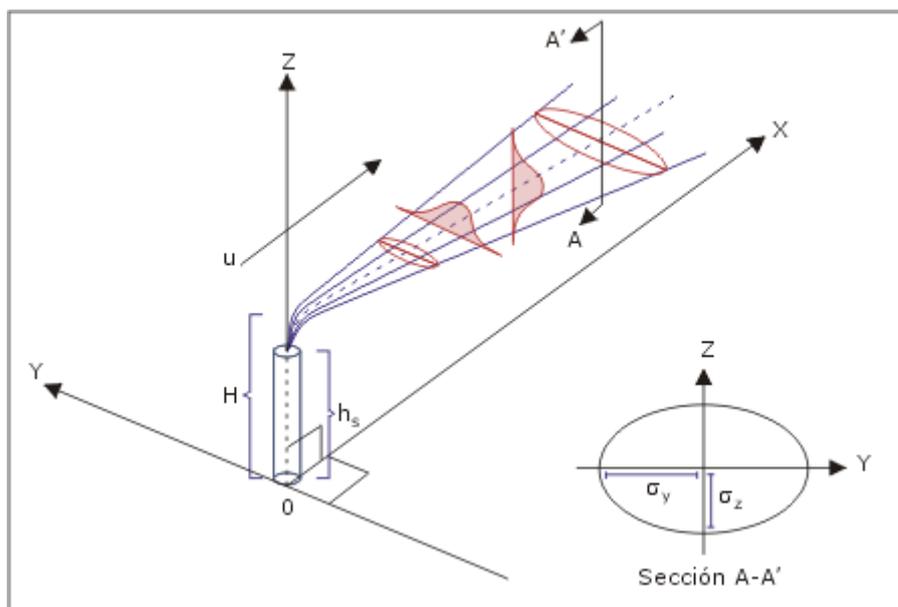


Figura 4. Representación esquemática del Modelo de Pluma Gaussiana (Organización Panamericana de la Salud, 2005).  $h_s$  representa la altura a la que se realiza la liberación,  $H$  la altura final que alcanza la liberación una vez en equilibrio con su entorno (altura efectiva) y  $A-A'$  una sección transversal de la pluma.

El Modelo de Pluma Gaussiana supone la conservación del flujo de masa a través de una superficie perpendicular a la dirección del viento. Es decir, que el flujo másico a través de cualquier sección transversal de la pluma es igual a la tasa de emisión. Esto implica que no se remueve material por reacciones químicas ni por deposición superficial. Además, el material que alcanza la superficie es reflejado nuevamente a la atmósfera (Pal Arya, 1999).

El supuesto de que la distribución de concentraciones medias sigue una distribución normal es una aproximación adecuada bajo condiciones de flujo uniforme y turbulencia homogénea y estacionaria (Seinfeld y Pandis, 2006). Esta y otras limitaciones hacen que sea necesario aplicar modificaciones al modelo. Algunas de estas pueden contemplar que la fuente sea de tamaño finito y no puntual, que  $Q$  varíe en función del tiempo, que las condiciones meteorológicas cambien con el tiempo y con la altura, que se den procesos de depleción y resuspensión, que los edificios y rugosidades del terreno modifiquen el desplazamiento de la pluma (IAEA, 1986).

## 2.4 Cálculo de dosis

La dosimetría de radiación es el cálculo de la dosis absorbida en órganos como resultado de la exposición a la radiación ionizante. La dosis se expresa en unidades de Sievert (Sv) que en el Sistema Internacional de Unidades corresponde a  $J \cdot kg^{-1}$ . Dependiendo del tipo de exposición, se diferencian la dosimetría interna y la dosimetría externa.

El término *dosimetría externa* se refiere a métodos de estimación de dosis de radiación a los tejidos del cuerpo humano debida a la exposición a radionucleidos u otras fuentes de radiación ubicadas fuera del cuerpo. Estas radiaciones tienen la capacidad de penetrar en el cuerpo, depositando energía en órganos y tejidos, con potencialidad de causar daño a las personas irradiadas. Las personas están expuestas mientras se encuentran en la zona contaminada. Las vías más importantes de exposición externa son inmersión en una nube

atmosférica contaminada, inmersión en agua contaminada y exposición a una superficie o volumen de suelo contaminado (Till y Grogan, 2008).

La *dosimetría interna* hace referencia a los métodos de estimación de dosis debida a la incorporación de material radiactivo. Una vez que el material radiactivo está dentro del cuerpo, la energía emitida en la desintegración del radionucleido será absorbida en los tejidos del cuerpo y puede generar daños en los mismos (Till y Grogan, 2008).

La dosis recibida por un organismo se puede expresar de distintas maneras. La *dosis equivalente* es la dosis promedio absorbida por un órgano o tejido, ponderada según el tipo de radiación (Till y Grogan, 2008). La Ecuación 2 muestra la cuantificación de la dosis equivalente,  $H_T$ .

$$H_T = \sum w_R \cdot D_{T,R} \quad (2)$$

Donde  $w_R$  representa el factor de ponderación según la radiación emitida por el radionucleido y  $D_T$  la dosis absorbida promediada sobre el volumen de un tejido u órgano  $T$  debida al tipo de radiación  $R$ .  $w_R$  considera las diferencias en la eficiencia de las distintas radiaciones para causar efectos estocásticos (Till y Grogan, 2008).

La *dosis efectiva* es la suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo. La Ecuación 3 muestra la cuantificación de la dosis efectiva,  $E$ .

$$E = \sum w_T \cdot H_T \quad (3)$$

Donde  $w_T$  representa la radiosensibilidad de los distintos órganos o tejidos y  $H_T$  la dosis equivalente (Till y Grogan, 2008).  $w_T$  es el factor por el que se pondera la dosis equivalente en un órgano o tejido  $T$  para representar la contribución relativa de ese órgano o tejido al detrimento total en la salud que resulta de una exposición total del cuerpo, de forma que la suma de los factores  $w_T$  de todos los tejidos y órganos del cuerpo es 1 (ICRP, 2007).

La *dosis equivalente comprometida* en órgano o tejido,  $H_T(\tau)$ , es la integración en el tiempo de la *tasa de dosis equivalente* en un órgano o tejido particular debido a la incorporación de material radiactivo en el cuerpo de una persona, donde  $\tau$  es el tiempo de integración expresado en años, después de la incorporación. La *dosis efectiva comprometida*,  $E(\tau)$ , es la suma de los productos de las *dosis equivalentes comprometidas* en órganos o tejidos y de los factores de ponderación del órgano o tejido correspondiente. El período de compromiso se considera como 50 años para adultos y hasta la edad de 70 años para niños (ARN, 2001). La diferencia en los períodos se debe a que se consideran los años de vida que le queda a la persona hasta cumplir su esperanza de vida. En este trabajo nos referiremos como dosis a la *dosis efectiva*.

## 2.5 Radioprotección y normativa

El uso de radiación ionizante en la medicina, el tratamiento de alimentos, la producción de energía, la industria y la investigación genera amplios e importantes beneficios tanto para las personas como para la sociedad. Por otro lado, debido a que las propiedades inherentes de la radiación ionizante pueden implicar un peligro para la salud, es necesario evaluar y controlar el riesgo radiológico.

El IAEA elabora normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el riesgo para la vida de las personas y para los bienes. Además, el ICRP elaboró un Sistema Internacional de Normas y Recomendaciones que sirve de base para la legislación en todo el mundo.

La protección radiológica se basa en la aplicación simultánea de tres principios (CNEA, 2018a):

- Justificación: Toda actividad humana que implique la exposición a radiaciones debe producir un beneficio positivo, concreto y mensurable.
- Limitación de dosis: Todas las exposiciones deben ser inferiores a los límites recomendados por el ICRP.
- Optimización: Todas las exposiciones deben reducirse tanto como sea razonable posible para lograr dosis por debajo de los límites.

Los límites de dosis establecidos por el ICRP prevén que el riesgo asociado a las prácticas que emplean tecnología nuclear sea semejante o inferior a la de cualquier otra actividad humana (CNEA, 2018a).

En Argentina, la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) es el organismo dedicado a la regulación de la actividad nuclear en las áreas de seguridad radiológica y nuclear, de salvaguardias y no proliferación y de protección y seguridad física (ARN, s.f.). Es una entidad autárquica dependiente de la Presidencia de la Nación, y fue creada en 1997 según lo establecido en la Ley Nacional N° 24.804 denominada Ley Nacional de la Actividad Nuclear.

La ARN elabora las normas regulatorias de aplicación obligatoria para todas las actividades con radiaciones ionizantes de origen nuclear. Las normas establecen los requisitos para las instalaciones y prácticas y para el personal que opera las instalaciones o realiza las prácticas mencionadas.

La Norma AR 10.1.1 aprobada en el año 2001, titulada “Norma básica de seguridad radiológica” (ARN, 2001), tiene como objetivo lograr un nivel apropiado de protección de las personas contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes y de seguridad de las fuentes de radiación. En dicha Norma se adoptan los tres principios mencionados anteriormente.

Allí también se establece que, durante la operación normal de una Instalación o la realización de una práctica, ningún individuo debe ser expuesto a dosis de radiación superiores a los límites establecidos. Para computar la dosis efectiva total a comparar con los límites correspondientes, se deben sumar la dosis efectiva en un año debida a exposición externa y la dosis efectiva comprometida debida a incorporaciones en ese mismo año; no deben incluirse las dosis originadas en la exposición médica ni las provenientes del fondo natural de radiación. El límite de dosis efectiva para miembros del público es 1 mSv en un año (ARN, 2001).

En esta misma norma (ARN, 2001) se especifica que, en el diseño u operación de una instalación, se debe prevenir la ocurrencia de accidentes, así como mitigar sus consecuencias radiológicas en el caso de que estos ocurran. Para estimar el riesgo radiológico de una instalación se deben analizar todas las secuencias accidentales previsible.

La Norma AR 3.1.3., titulada “Criterios radiológicos relativos a accidentes en reactores nucleares de potencia” (ARN, 2002), establece las condiciones generales que deben cumplir las instalaciones nucleares para prevenir la ocurrencia de accidentes, así como mitigar las consecuencias radiológicas en el caso de que estos ocurran.

## 2.6 Evaluación del Riesgo Radiológico Individual

Como se mencionó anteriormente, la Norma AR 3.1.3 (ARN, 2002) establece las condiciones generales que deben cumplirse en el diseño para proteger al público en caso de la ocurrencia de accidentes.

El *Riesgo Radiológico Individual (RRI)* se puede definir como la probabilidad de la intersección de dos sucesos: el suceso *exposición a la radiación ionizante* y el suceso *fatalidad* debido a la exposición a dicha radiación (ARN, 2002). La Ecuación 4 muestra cómo se calcula el *RRI*.

$$RRI = P(E \cap F) \quad (4)$$

El suceso de exposición del individuo dependerá de las características de la planta, del transporte y dispersión en la atmósfera, de la topografía del terreno, de la demografía y de las vías de exposición, entre otros aspectos. En el cálculo de la probabilidad de exposición se considera la frecuencia anual de ocurrencia de la liberación de material radiactivo a la atmósfera y la probabilidad de que la condición meteorológica sea tal que un individuo quede expuesto (Giménez y Caputo, 2020).

El suceso fatalidad debido a dicha exposición dependerá de la dosis  $d$  recibida por el individuo según la función  $f(d)$ . Donde  $f(d)$  queda definida según la Ecuación 5 (Giménez y Caputo, 2020).

$$f(d) = \begin{cases} 10^{-5} & d \leq 0.0002 \text{ Sv} \\ 0.05 d & 0.0002 \text{ Sv} \leq d \leq 1 \text{ Sv} \\ 0.05 d^{1.67} & 1 \text{ Sv} \leq d < 6 \text{ Sv} \\ 1 & d \geq 6 \text{ Sv} \end{cases} \quad (5)$$

El riesgo debe ser evaluado para cada posición definida en la inmediación de la planta. Esto se hace considerando la dosis correspondiente a cada condición meteorológica y cada Categoría de Liberación (*CL*). Las *CL* representan los distintos términos fuente que pueden darse en la planta y su probabilidad de ocurrencia para los diferentes escenarios de accidente que pueden acontecer en la planta (Giménez y Caputo, 2020).

El *RRI* se calcula como el riesgo al que podría estar expuesto un individuo, al realizar la sumatoria de los riesgos no nulos en cada posición debidos a las distintas condiciones meteorológicas. A partir de esto, se puede obtener el *RRI* máximo ( $RRI_{m\acute{a}x}$ ) en el área y su localización (Giménez y Caputo, 2020).

El valor de  $RRI_{m\acute{a}x}$  se utiliza para otorgar o no la licencia de construcción de la central, según criterios de la ARN. El mismo se calcula en función de una potencial liberación, para un período de 24 h y no incluye contramedidas (ARN, 2002).

El valor límite impuesto al *RRI* tiene como objetivo asegurar que las exposiciones potenciales de miembros del público sean menores a las que corresponden a las prácticas normales. Se considera como práctica normal a la exposición a radiación de manera planificada, como por ejemplo realizarse una radiografía de rayos X. Dicho valor no debe ser excedido por ningún individuo en las inmediaciones de la planta. El riesgo límite para prácticas normales es de  $15 \times 10^{-6}$ . Este valor se determinó al considerar que el límite de dosis anual para el público

establecido de 1 mSv corresponde a tres exposiciones radiológicas planeadas al año y al considerar la probabilidad de exposición igual a 1 (ARN, 2002).

El *RRI* para exposiciones potenciales debe ser menor al mencionado anteriormente, por eso la ARN fija un  $RRI_{máx}$  de  $10^{-6}$ . La diferencia entre los mismos permite considerar las incertezas asociadas al cálculo de dicho riesgo (ARN, 2002).

A fin de limitar la contribución de cada *CL* al *RRI* total de la instalación nuclear, la ARN establece otras pautas. Si *N* es la cantidad total de *CL*, y considerando que  $N \leq 10$ , el *RRI* asociado a cada una de las *CL*, deberá ser menor a un décimo del límite establecido para *RRI* total. Es decir, debe ser menor que  $10^{-7}$ . Si  $N > 10$  el riesgo límite para cada *CL* será de  $10^{-6}/N$  (ARN, 2002).

Otra forma para definir el criterio de aceptación de la instalación es comparando los resultados obtenidos de dosis efectiva y la probabilidad de exposición al término fuente con la Curva Criterio para el Público (ARN, 2002) que se muestra en la Figura 5.

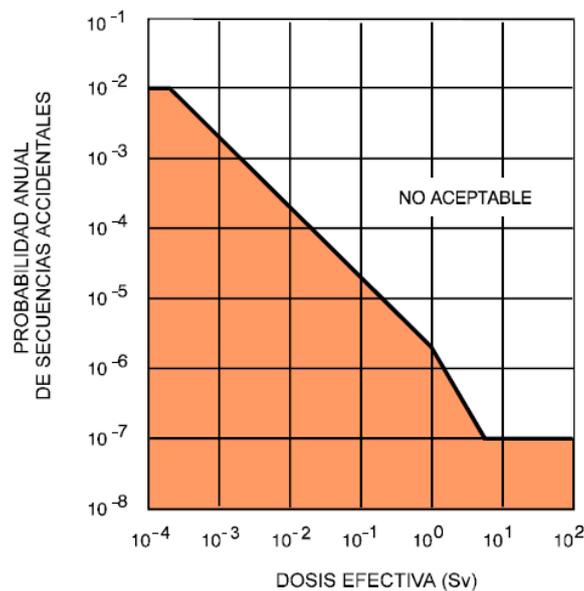


Figura 5. Curva Criterio para el Público según Norma AR 3.1.3 (ARN, 2002).

En la Figura 5 se pueden observar dos zonas delimitadas por una línea negra. Se trata de una curva de iso-riesgo, cuyo valor es  $10^{-7}$ . Por encima de la misma, sin colorear, se encuentra la zona “No Aceptable” y, por debajo, coloreada, la zona de aceptación. La ARN exige como condición necesaria de aceptación que el punto resultante de la intersección de la dosis efectiva y la probabilidad de exposición asociadas a una *CL* se encuentre dentro de la región “Aceptable” de la representación gráfica del criterio de aceptación o Curva Criterio.

### 3 Objetivos

En este proyecto se evaluarán los siguientes objetivos pedagógicos y técnicos.

#### 3.1 Objetivos pedagógicos

Introducir al alumno en los conceptos y metodologías asociados a la evaluación del grado de seguridad de una instalación o, en términos complementarios, la estimación del riesgo radiológico individual de una instalación nuclear.

Integrar los conocimientos adquiridos a lo largo de su formación, destacándose las materias de Análisis de Riesgo, Política y Legislación Ambiental, Química y Contaminación Ambiental, Contaminación Atmosférica y Modelado de la Dispersión Atmosférica.

Introducir al alumno en un ámbito laboral donde se realizarán discusiones en equipo, puesta en común de ideas e interacción con profesionales de diversas áreas.

#### 3.2 Objetivos técnicos

Calcular la dispersión del material radiactivo liberado a la atmósfera, durante un hipotético accidente en una central nuclear genérica.

Calcular el riesgo radiológico individual relativo en las inmediaciones de la instalación nuclear genérica.

Calcular el impacto económico relativo de las posibles contramedidas a adoptar para la mitigación de las consecuencias.

## 4 Herramientas de cálculo

A fin de modelar la dispersión atmosférica del material radiactivo, calcular las dosis resultantes en el público y el impacto económico se utilizó el software WinMACCS. Posteriormente, para realizar el cálculo del *RRl* se desarrolló un código utilizando el lenguaje de programación Python. Este código permite procesar los resultados obtenidos con WinMACCS, calcular el *RRl* y graficar las curvas de nivel de *RRl* en el área de estudio.

### 4.1 Descripción del código WinMACCS

El código WinMACCS utiliza un Modelo de Pluma Gaussiana para evaluar las consecuencias de posibles accidentes severos en plantas nucleares de potencia. Este código comprende una serie de ajustes realizados sobre el Modelo de Pluma Gaussiana descrito anteriormente en la sección 2.3 que le permiten abarcar otros aspectos y realizar mejores aproximaciones de la realidad.

El código Melcor Accident Consequence Code System (MACCS) fue desarrollado por Sandia National Laboratories con el patrocinio de la United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). El mismo se elaboró con el objetivo de estimar las consecuencias de posibles accidentes severos en plantas nucleares de potencia. Fue lanzado públicamente en el año 1990 (Young, 1995).

En 2001, la NRC creó una interfaz basada en el sistema operativo Windows para hacer más simple e intuitivo el uso de MACCS. Como resultado de este desarrollo se creó WinMACCS. Además de MACCS, WinMACCS integra otros códigos que optimizan su funcionamiento. Uno de estos códigos es COMIDA2, que permite evaluar los parámetros relacionados con la ingesta de alimentos contaminados (Chanin et al., 1990).

Los aspectos más relevantes que WinMACCS permite estimar son los siguientes (Jow et al., 1990):

- El transporte, la dispersión y la deposición del material radiactivo liberado.
- Las dosis en el corto y largo plazo recibidas por la población a través de vías de exposición directas (irradiación directa de la pluma y del material depositado en el suelo y sobre la piel, inhalación directa de la pluma y del material resuspendido) e indirectas (ingesta de alimentos contaminados).
- La mitigación de esas dosis mediante la aplicación de contramedidas.
- Los costos económicos de la implementación de dichas contramedidas.
- La cantidad de fatalidades y lesiones tempranas, que ocurren hasta un año después del accidente, y tardías o latentes, que pueden ocurrir en cualquier momento de la vida de los individuos expuestos.

WinMACCS modela el transporte y dispersión de plumas de material radiactivo liberadas a la atmósfera. En este código, los gases y aerosoles que conforman la pluma son dispersados en la atmósfera mientras son transportados por el viento (Young, 1995).

El código permite dividir la liberación de material radiactivo a la atmósfera en segmentos sucesivos, cada uno generando sucesivas plumas gaussianas. Cada segmento puede tener distinta composición de radionucleidos, instantes de liberación, duración, contenido de calor sensible, entre otros. Esto implica que la liberación se modela como una serie de plumas.

Durante la evolución de la pluma, el material puede sufrir decaimiento radiactivo y ser depositado en el suelo mediante procesos de deposición húmeda y seca (Young, 1995). La deposición húmeda corresponde al barrido de los contaminantes por las gotas de precipitación. La deposición que no es causada por la lluvia, se denomina deposición seca (Jow et al., 1990). Estos procesos influyen en los cálculos de concentraciones y dosis que realiza WinMACCS.

Las características de la liberación junto con las condiciones climáticas inmediatamente después de la misma determinan el proceso de transporte y dispersión que les sigue, así como también la magnitud de las consecuencias resultantes (Young, 1995).

WinMACCS permite estimar la amplitud y la probabilidad de los efectos sobre la salud producto de la exposición a radiaciones, los costos y las pérdidas económicas que resulten de la contaminación de la atmósfera y el terreno, tanto el ocupado por población como por cultivos (Jow et al., 1990).

#### 4.1.1 Fases

El código divide la situación accidental en tres fases temporales (Chanin et al., 1990):

- **Emergencia:** comienza justo después del accidente y puede durar hasta siete días posteriores. En este período la población se ve expuesta al paso de la pluma y deben tomarse medidas de protección inmediata. Estas acciones pueden incluir evacuación, refugio, relocalización temporal y suministro de pastillas KI. Se evalúan los efectos en la salud y fatalidades tempranas.
- **Intermedia:** representa el período en el que se realizan evaluaciones y se toman decisiones sobre las medidas que se llevarán a cabo. Se considera que la pluma ya ha pasado y la población se encuentra expuesta a las radiaciones provenientes del suelo contaminado. Como acción de mitigación se considera únicamente la relocalización temporal. El modelado de esta fase es opcional.
- **Largo plazo:** comprende el período siguiente a la fase intermedia. En este se toman las medidas necesarias para reducir las dosis y concentraciones ambientales a niveles aceptables. Las contramedidas incluidas en esta fase son: descarte de productos agrícolas, prohibición temporal de la agricultura, remediación, remediación seguida de interdicción y expropiación de propiedades. La duración del período de exposición modelado en esta fase es, esencialmente, infinita.

#### 4.1.2 Módulos

El código WinMACCS consta de tres módulos:

- **ATMOS:** este módulo realiza los cálculos del transporte, dispersión y deposición de material radiactivo. También modela el decaimiento radiactivo previo a la liberación, mientras el material está en la atmósfera y una vez depositado. ATMOS calcula las concentraciones de actividad en aire y en la superficie del suelo. Además, calcula las dimensiones de cada segmento de pluma y los tiempos de llegada y salida a los puntos de interés donde se quiere evaluar el impacto (Chanin et al., 1990). Los resultados de ATMOS son utilizados posteriormente por los otros módulos.
- **EARLY:** este módulo modela el período posterior a la liberación, es decir, la fase de emergencia y arroja resultados sobre la dosimetría en la población. En este módulo se deben especificar los distintos escenarios de respuesta de la población. Los escenarios en esta fase pueden incluir continuar con la actividad normal, evacuar, refugiarse, relocalizarse y bloqueo de tiroides (Chanin et al., 1990).

- CHRONC: este módulo calcula las consecuencias en dos intervalos temporales: el intermedio y el de largo plazo. Evalúa los efectos en la salud de los individuos que resultan de las distintas vías de exposición internas y externas. También computa los costos económicos de las acciones de protección a largo plazo, incluyendo el costo de las acciones de respuesta de emergencia calculado en EARLY (Chanin et al., 1990).

#### 4.1.3 Dosimetría

El modelo de dosimetría consta de tres procesos que interactúan (Young, 1995):

- la proyección de exposiciones individuales a contaminación radiactiva para cada una de las vías de exposición modeladas,
- la mitigación de estas exposiciones por acciones de protección,
- el cálculo de las exposiciones estimadas después de la mitigación por la aplicación de las medidas de protección.

WinMACCS permite modelar distintas vías a través de las que la población puede exponerse a la radiación: irradiación directa de la pluma y del material depositado en el suelo y sobre la piel, inhalación directa de la pluma y del material resuspendido, incorporación de alimentos y agua contaminados (Jow et al., 1990).

En cada vía se analiza el efecto de las distintas medidas de protección. En el largo plazo también se consideran aquellas medidas tendientes a reducir las concentraciones ambientales y los tiempos de exposición a las mismas (Jow et al., 1990).

Las medidas de protección analizadas en este trabajo son: refugio, evacuación, relocalización y suministro de pastillas de yoduro de potasio. Todas estas acciones son realizadas durante la fase de emergencia.

Los efectos en la salud se calculan a partir de las dosis en órganos específicos utilizando factores de conversión de dosis. Usando distintos modelos de dosis-respuesta WinMACCS evalúa efectos como lesiones, cáncer, muerte temprana, entre otros (Young, 1995).

El modelo de ingestión se basa en el principio de que la dosis a largo plazo producida por cualquier radionucleido en un órgano a través de la alimentación es el producto de la concentración en el suelo del radionúclido, el factor de transferencia integrado del radionúclido para la vía y el factor de conversión de dosis por ingestión (Chanin et al., 1990).

WinMACCS trabaja sobre una grilla que divide el dominio en elementos espaciales según distancias radiales y ángulos definidos por el usuario. El tiempo de exposición se calcula para cada elemento espacial en función del tiempo en que la pluma pasa por el elemento y de la actividad que esté realizando la población allí presente (actividad normal, refugio, evacuación o relocalización) (Jow et al., 1990).

Para esto, se considera que, una vez que el segmento de pluma se liberó completamente, este no se ve afectado por difusión durante el transporte del mismo. Conociendo el tiempo en que la pluma ingresa y egresa de un elemento espacial, a partir de la distancia a la fuente y la velocidad del viento, se puede calcular el tiempo de exposición de los individuos allí presentes. Si los mismos se transportan a otro elemento espacial o si cambian de actividad, su tiempo de exposición variará (Jow et al., 1990).

#### 4.1.4 Análisis económico

En el código WinMACCS, las consecuencias económicas resultan de la implementación de acciones de mitigación y remediación. Los costos analizados en los modelos económicos son (Jow et al., 1990):

- Costo de evacuación.
- Costo del alojamiento y alimentación para las personas relocalizadas temporalmente.
- Costo de remediación en propiedades (terrenos y edificios) que podrán volver a ser usadas luego de este procedimiento.
- Pérdidas económicas producidas por la interdicción temporal de tierras cultivables y no cultivables hasta lograr la reducción de las concentraciones a niveles aceptables.
- Pérdidas económicas producidas por desechar leche, carne y cultivos.
- Pérdidas económicas producidas por la interdicción permanente o expropiación de propiedades.

La evacuación implica el movimiento de los individuos hacia otra zona donde no reciban más dosis. El refugio se da mientras la pluma está pasando por una zona y no implica un costo en sí, ya que la gente permanece en sus hogares durante un período especificado. Igualmente, luego del paso de la pluma, esas personas pueden ser evacuadas. La relocalización involucra el movimiento de los individuos cuando las dosis efectivas proyectadas resultantes de un tiempo de exposición exceden el límite. Tanto el tiempo de exposición como el límite de dosis deben ser especificados por el usuario de WinMACCS (Jow et al., 1990).

El costo de las acciones de protección durante la fase de emergencia ( $CE$ ) aplicado a cada elemento espacial se calcula, de manera simplificada, utilizando la Ecuación 6 (Jow et al., 1990).

$$CE = P \cdot D \cdot I \quad (6)$$

Donde  $P$  es el número de individuos,  $D$  es la duración de la medida tomada e  $I$  es el costo diario por persona de la medida. El costo diario por persona incluye el alojamiento, la alimentación y los ingresos perdidos. El  $CE$  se calcula para cada elemento espacial y luego se realiza una sumatoria de los mismos.

Los costos evaluados en la fase de largo plazo están relacionados con las acciones mediante las cuales se busca reducir los efectos a la salud a largo plazo. Esas acciones incluyen: remediación, remediación seguida de interdicción, descarte de productos agrícolas y ganaderos, prohibición temporal de la agricultura y ganadería, y expropiación de propiedades (Jow et al., 1990).

Los costos de las acciones de protección a largo plazo dependen del accidente, el período del año en que ocurre, la zona, las acciones de protección tomadas y la duración de las mismas. El costo de las acciones de protección durante la fase de largo plazo ( $CLT$ ) aplicado a cada elemento espacial se calcula, utilizando la Ecuación 7 (Jow et al., 1990).

$$CLT = CNF \cdot P + CF \cdot AF \quad (7)$$

Donde  $CNF$  es el costo por individuo de las acciones de protección sobre propiedades no agrícolas,  $P$  es el número de individuos,  $CF$  es el costo por individuo de las acciones de protección sobre propiedades agrícolas y  $AF$  es el área ocupada por la actividad agrícola. Las

propiedades no agrícolas incluyen propiedades de tipo residencial, comercial y público, junto con el equipamiento de las mismas.

En *CNF* se consideran acciones como la relocalización temporal o permanente de las personas, el valor de la propiedad y el costo de remediar la misma, además se tiene en cuenta la compensación económica por pérdida del valor de la propiedad. En *CF* se consideran las actividades tendientes a devolver la habitabilidad y productividad de las tierras y, en el caso de no ser posible remediarlas, la clausura e indemnización por las mismas, el descarte de la leche y otros productos contaminados (Jow et al., 1990).

#### 4.1.5 Datos de entrada

Al utilizar el código debe suministrarse información sobre diversos aspectos, ya sea en forma de archivos o especificada directamente por el usuario en las ventanas interactivas. De manera resumida, la información que debe ser provista es la siguiente (Jow et al., 1990):

- Inventario radiactivo: deben listarse los radionucleidos contenidos en el núcleo del reactor al iniciar el accidente y sus actividades en unidades de Curie o Bequerel.
- Término fuente: para cada segmento de pluma liberado se debe detallar el instante en que comienza a ser liberado, su duración y la altura de la liberación, el calor sensible que contiene y la fracción de cada elemento del inventario liberada.
- Información meteorológica: debe contener datos sobre velocidad de viento, clase de estabilidad atmosférica y precipitaciones medidas en una estación cercana. También son necesarios cuatro valores de altura de la capa de mezcla correspondientes a cada estación del año y momento del día. La capa de mezcla es definida por una inversión en el perfil vertical de temperatura.
- Grilla: la superficie a analizar se divide en una grilla polar centrada en el reactor. El usuario define el número de divisiones angulares y los radios.
- Distribución poblacional: se debe introducir la población presente en cada elemento de la grilla o una densidad poblacional uniforme.
- Respuesta ante emergencia: deben establecerse las medidas tomadas, el tiempo de retraso, las áreas afectadas, la velocidad promedio de evacuación, los criterios de dosis para la relocalización y para la decontaminación, etc.
- Uso del suelo y valor económico: se detallan las fracciones de suelo habitables y bajo cultivo, valor de los cultivos y de las propiedades.

## 4.2 Código de cálculo del RRI

Mediante el lenguaje de programación Python, se desarrolló un código para el cálculo del *RRI* según la definición presentada en la sección 2.6.

Las librerías de Python utilizadas en el código desarrollado son NumPy y Matplotlib. NumPy permite procesar los datos en forma de vectores y matrices, también aporta funciones para operar los mismos. Matplotlib posibilita la realización de gráficos a partir de listas o matrices. Particularmente, de Matplotlib se utilizaron los sub-módulos matplotlib.pyplot y matplotlib.colors.

Lo primero que realiza el código es cargar los datos del archivo Model1AllDose.bin obtenido utilizando WinMACCS. Este archivo contiene los valores de dosis que se usan para

evaluar la función  $f(d)$  (Ecuación 5). El archivo está en formato binario y el código lo traduce para poder interpretar los datos.

Como resultado se obtiene una matriz que contiene la dosis radiológica para cada trial, radio, ángulo y subángulo. Cada trial corresponde a una secuencia de datos meteorológicos. Recordemos que el accidente puede ocurrir en cualquier momento y con igual probabilidad durante el período de evaluación.

Mediante esta matriz, se calcula el  $RRI$  a partir de la Ecuación 4 para cada elemento espacial y se obtiene el  $RRI_{máx}$  en el área de estudio. Además, el código permite obtener valores de dosis máxima y dosis media para cada elemento espacial.

El código registra los valores de  $RRI$ , dosis media y dosis máxima para ciertos puntos de interés seleccionados en el mismo, acompañados de su ángulo y radio.

El código también permite graficar las curvas de isoriesgo, isodosis máxima e isodosis media para toda el área de estudio. Estos gráficos permiten ver de manera sencilla las contribuciones de las contramedidas a la variación del  $RRI$ .

Otra de las funciones del código es calcular y graficar el  $RRI$  relativo. Para esto se almacena en la memoria un valor de  $RRI_{máx}$ . Luego, las matrices obtenidas en las simulaciones son divididas por el  $RRI_{máx}$  y así se obtiene el  $RRI$  relativo. Este gráfico permite ver las variaciones del  $RRI$ .

En el Anexo 1 se muestra el código desarrollado.

## 5 Evaluaciones preliminares: Comprendiendo WinMACCS

En primera instancia, y para comprender el funcionamiento de WinMACCS, se realizaron pruebas sencillas con las que se alteró una variable por vez para observar cómo se modificaban concentraciones de actividad en aire a nivel del suelo. Las variables elegidas fueron: Clase de estabilidad, Vida media y Deposición seca.

Se utilizaron liberaciones de 1 h de duración, emitidas a 50 m de altura y en equilibrio térmico con el entorno. Además, para evitar el efecto de estela de los edificios, se estableció la altura mínima que permite WinMACCS de 1 m.

### 5.1 Clase de estabilidad atmosférica

En este código, la dispersión depende de la condición de estabilidad atmosférica y de la velocidad del viento, entre otros factores. Normalmente, se utilizan las Clases de Estabilidad Atmosférica de Pasquill. Estas clasifican la estabilidad atmosférica en base a mediciones de la velocidad del viento, la radiación solar para el día y la nubosidad para la noche (Seinfeld y Pandis, 2006). La Tabla 1 muestra los parámetros necesarios para estimar la clase de estabilidad.

Tabla 1.

*Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill.*

Velocidad del viento a 10 m [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Día			Noche	
	Radiación solar			Nubosidad	
	Fuerte	Moderado	Leve	$\geq \frac{4}{8}$	$\leq \frac{3}{8}$
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	D	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fuente: Seinfeld y Pandis (2006).

La clase A representa una condición de estabilidad atmosférica extremadamente inestable, B moderadamente inestable, C levemente inestable, D neutra, E ligeramente estable y F moderadamente estable. La capacidad de dispersión de contaminantes en la atmósfera será mayor, cuanto más inestable sea la atmósfera.

Si bien la dispersión horizontal de los segmentos de la pluma no tiene restricciones, la dispersión vertical está limitada por el suelo y por el tope de la capa de mezcla. Tanto el suelo como el tope de la capa de mezcla se modelan como superficies totalmente reflectantes (Young, 1995).

Para comparar el efecto de las distintas Clases de Estabilidad se usaron condiciones meteorológicas constantes y no se consideraron los procesos de deposición seca y húmeda. En este caso se utilizaron las clases más representativas: Extremadamente Inestable (A), Neutra (D) y Ligeramente Estable (F). En la Tabla 2 se muestran los valores de velocidad del viento y altura de la capa de mezcla usados para cada una.

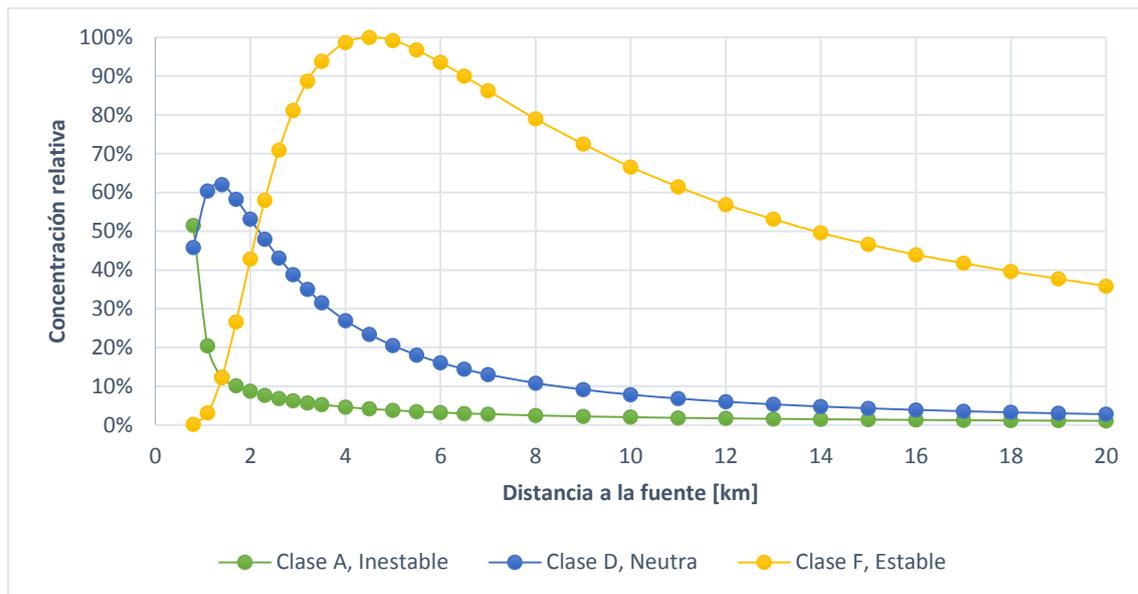
Tabla 2.

*Relación entre variables meteorológicas y las Clases de Estabilidad.*

Clase de Estabilidad	Velocidad del viento [ $m \cdot s^{-1}$ ]	Altura de la capa de mezcla [m]
A	1	1300
D	5	800
F	2	100

Fuente: Colls (2002).

La Figura 6 muestra los valores obtenidos de concentración relativa de actividad en el aire a nivel del suelo para las diferentes clases de estabilidad consideradas, a lo largo del eje de dispersión de la pluma.



*Figura 6.* Variación de la concentración relativa de actividad en aire a nivel del suelo en función de la distancia para distintas Clases de Estabilidad Atmosférica. Nota: la concentración relativa se calculó dividiendo las concentraciones por el máximo valor obtenido que corresponde a la clase F a 4.5 km de la central.

La primera distancia a la que se muestra un valor de concentración es a 800 m de la fuente. Esto se debe a una limitación del código que no permite modelar con certeza la distribución de la concentración a distancias menores de 500 m de la fuente.

Se puede observar que para la clase A se obtuvo un pico muy cercano a la fuente y que luego la concentración disminuye rápidamente. En la clase D se observa un pico mayor que en A y más alejado de la fuente, en esta la concentración disminuye con la distancia de manera más suave. Para la clase F se puede observar que el pico se da más lejos que en las otras dos clases y que presenta concentraciones más altas que las otras luego de los 2500 m.

En general, la clase A presenta valores de concentración menores y una mayor disminución de la concentración en función de la distancia respecto a las otras dos clases estudiadas. Esto se debe a que la clase inestable (A) genera una dilución mayor que las clases más estables (D y F).

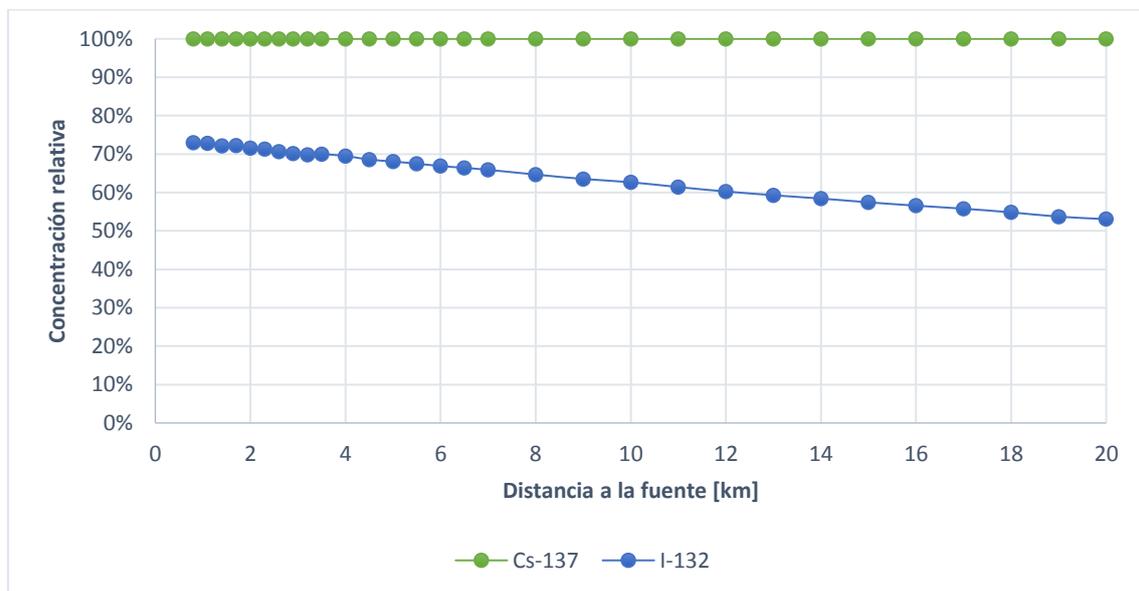
Este ejemplo sencillo nos permite entender que, dependiendo de las condiciones meteorológicas imperantes en el instante en que se da la liberación a la atmósfera, variarán las consecuencias de la misma.

## 5.2 Vidas medias

Para ver cuál es el efecto del decaimiento radiactivo implementado por el código se realizaron dos pruebas, una con un radionucleido de vida media larga y otro de vida media corta.

Para definir cuál sería de vida media larga y corta se consideró el tiempo que le tomaría a la pluma atravesar el dominio (20 km) bajo la condición meteorológica D mencionada anteriormente. El tiempo calculado es de aproximadamente 1 h y 7 min. A partir de esto, se seleccionaron dos radionucleidos, el Cs-137, con una vida media de 30 años; y el I-132, con una vida media de 2.3 h. De ambos radionucleidos se liberó la misma actividad:  $3.7 \times 10^{10}$  Bq. No se incluyeron los procesos de deposición húmeda y seca de material radiactivo.

La Figura 7 muestra los valores obtenidos de concentración relativa al Cs-137 de actividad en el aire a nivel del suelo, a lo largo del eje de dispersión de la pluma.



*Figura 7.* Variación de la concentración relativa al Cs-137 de actividad en aire a nivel del suelo con la distancia para radionucleidos de distintas vidas medias. Nota: se calculó la concentración relativa a cada distancia dividiendo el valor obtenido respecto a la concentración del Cs-137 en ese lugar.

Se puede observar que la concentración relativa de I-132 es menor a la del Cs-137, aun cuando se liberó la misma actividad. Esto se debe a que el I-132 tiene una vida media más corta que el Cs-137.

## 5.3 Deposición seca

La deposición seca se modela usando el Source Depletion Model de Chamberlain adaptado para el tratamiento de distribuciones de tamaños de partículas (Jow et al., 1990). Este modelo calcula la tasa de deposición en función de la concentración de actividad en el aire cerca del suelo y de la velocidad de deposición. Esta última depende del tamaño de partícula (Young, 1995). Como la cantidad de material depositado es mucho menor que la que permanece suspendida, la concentración en el aire cerca del suelo no varía significativamente.

Para analizar el efecto de este proceso se realizaron dos simulaciones iguales, pero solo en una de estas se utilizó la deposición seca. Las pruebas se realizaron bajo la condición

atmosférica neutra (D), se utilizó un único tamaño de aerosoles con una velocidad de deposición de  $1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Se utilizó el Cs-137 ya que en este radionucleido se puede despreciar el efecto del decaimiento radiactivo.

En la Figura 8 se muestra la variación de la concentración relativa de actividad en aire a nivel del suelo considerando deposición seca, a lo largo del eje de dispersión de la pluma.

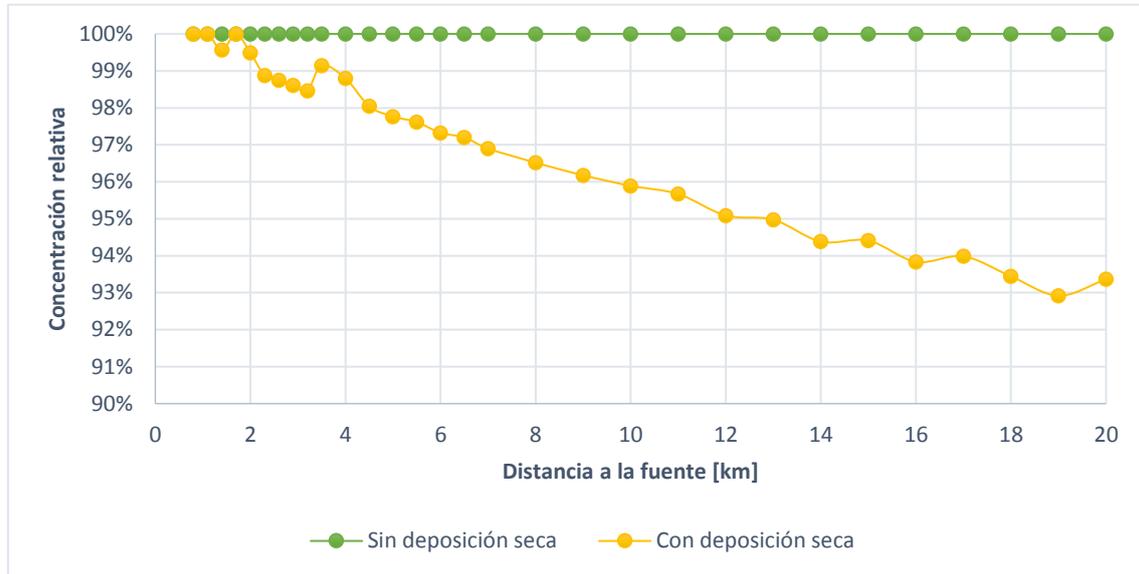


Figura 8. Variación de la concentración relativa de actividad en aire a nivel del suelo considerando deposición seca. Nota: se calculó la concentración relativa a cada distancia dividiendo el valor obtenido respecto a la concentración sin deposición seca en ese lugar.

Se puede observar que, al considerar la deposición seca, disminuye la concentración relativa de actividad en el aire. A su vez, la concentración absoluta de actividad en el aire continúa con el comportamiento mostrado en la Figura 6 (Clases de Estabilidad Atmosférica) para la clase D, es decir que la concentración tiene un pico a 1.4 km de la central y luego disminuye con la distancia. La diferencia entre ambas curvas corresponde al material depositado en el suelo, como se muestra en la Figura 9.

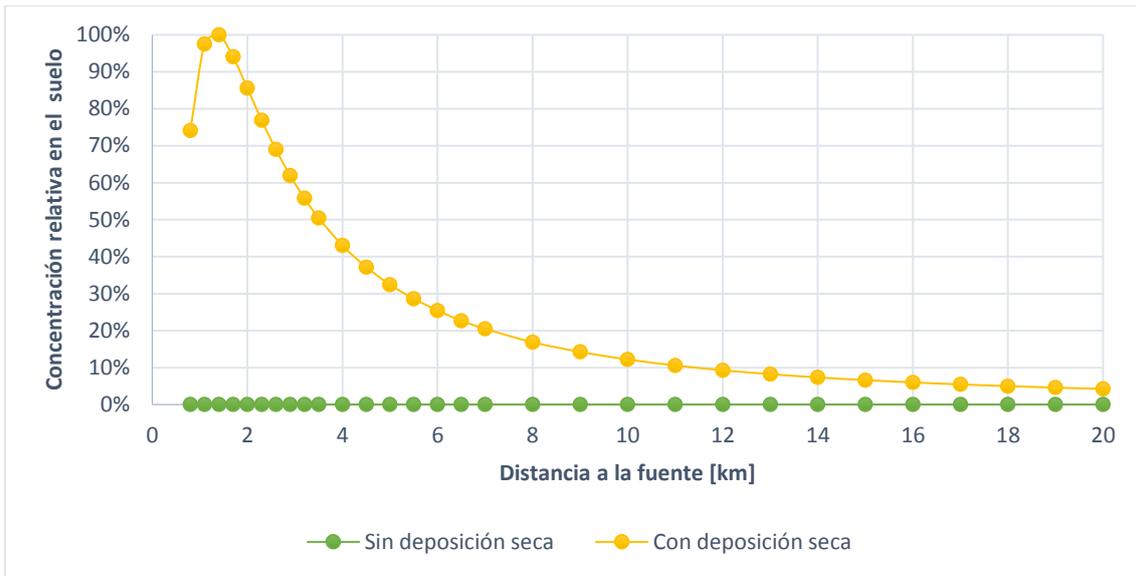


Figura 9. Variación de la concentración relativa de actividad depositada en el suelo considerando deposición seca. Nota: se calculó la concentración relativa a cada distancia dividiendo el valor obtenido respecto a la concentración máxima obtenida con deposición a 1.4 km de la central.

Si bien no parece haber variado significativamente la concentración de actividad en aire a nivel del suelo, en la Figura 9 se puede ver que considerar la deposición es fundamental para el cálculo de dosis. El material depositado en suelo puede ser incorporado al organismo a través del consumo de agua o alimentos contaminados y a través de la inhalación por el mecanismo de resuspensión.

## 6 Casos de estudio

En primer término, se definió un caso de estudio teórico basado en la bibliografía analizada, este es el Caso 0: Sin aplicación de contramedidas. Posteriormente se verificó si el caso postulado cumple o no con la normativa vigente establecida por la ARN. Luego, simulando otros casos de estudio se analizó el impacto de la implementación de contramedidas de dos maneras distintas: aplicando una medida de mitigación por vez en todo el dominio y aplicando medidas de manera progresiva y por zonas. La fase intermedia no fue considerada para el análisis.

### 6.1 Hipótesis de cálculo y datos de entrada

En este apartado se muestran los datos utilizados en este caso de estudio. Los mismos están conformados por el término fuente (características de la liberación), las condiciones meteorológicas y las características de la población y de la región de estudio.

#### 6.1.1 Término fuente

Para la realización de estas simulaciones complejas se tomó como base uno de los escenarios de accidentes descritos en el documento State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA), Volume 2: Surry Integrated Analysis Project (NUREG/CR-7110, Vol. 2). Dicho documento fue realizado por la NRC con la finalidad de brindar una evaluación realista de la secuencia del accidente, el término fuente y las consecuencias en el área cercana a la planta de energía nuclear Surry, ubicada en el condado de Surry, Virginia, Estados Unidos.

De los eventos allí descritos se decidió utilizar como término fuente el denominado "Short-Term Station Blackout Unmitigated". Este evento es iniciado por un sismo extremadamente severo e improbable, con una recurrencia mayor a uno en mil años y que supera las bases de diseño, resultando en la pérdida total del suministro eléctrico en la instalación, incluyendo el suministro eléctrico de emergencia; y desencadenando la falla de diversos sistemas de control y seguridad, con la posterior liberación de material radiactivo a la atmósfera. Aquí, la palabra "unmitigated", que se traduce como "no mitigado", hace referencia a las medidas tendientes a evitar la liberación a la atmósfera a través de los sistemas de seguridad de la planta y no a las acciones de protección del público. Este escenario tiene una frecuencia anual de  $2 \times 10^{-6}$  año<sup>-1</sup> (Sandia National Laboratories, 2012).

Para modelar el comportamiento de los distintos radionucleidos, WinMACCS los clasifica en grupos según su clase. En el Anexo 2, Tabla A2-1, se muestra el inventario del núcleo de la planta de energía nuclear Surry para distintas clases de radionucleidos y en la Tabla A2-2 se muestra el inventario en función la actividad total de cada radionucleido presente en el núcleo.

En la Tabla A2-3, del Anexo 2, se muestran, para los distintos segmentos de pluma: el instante de liberación, la duración de la liberación, el caudal másico y la densidad de la liberación.

Se puede observar que el tiempo de liberación de la primera pluma se da a los 0 s, esto implica que ese segmento es liberado en el momento del SCRAM. El SCRAM es la parada de emergencia del reactor que se realiza mediante la inserción de las barras absorbentes de neutrones que detienen el proceso de la fisión. Para los casos de estudio donde se aplican contramedidas, se consideró que en este mismo instante se da aviso a la población para que actúe ante la emergencia y adopte las contramedidas establecidas.

En cada segmento de pluma se libera una fracción del inventario del núcleo. En la Tabla A2-4, del Anexo 2, se muestran las fracciones de liberación correspondientes a cada segmento de pluma y cada clase de radionucleido definidos en la Tabla A2-1.

El grupo de los gases nobles, representado por Xe, presenta las fracciones de liberación más altas. En la Figura 10 se muestra la fracción de liberación del inventario del grupo Xe en forma porcentual.

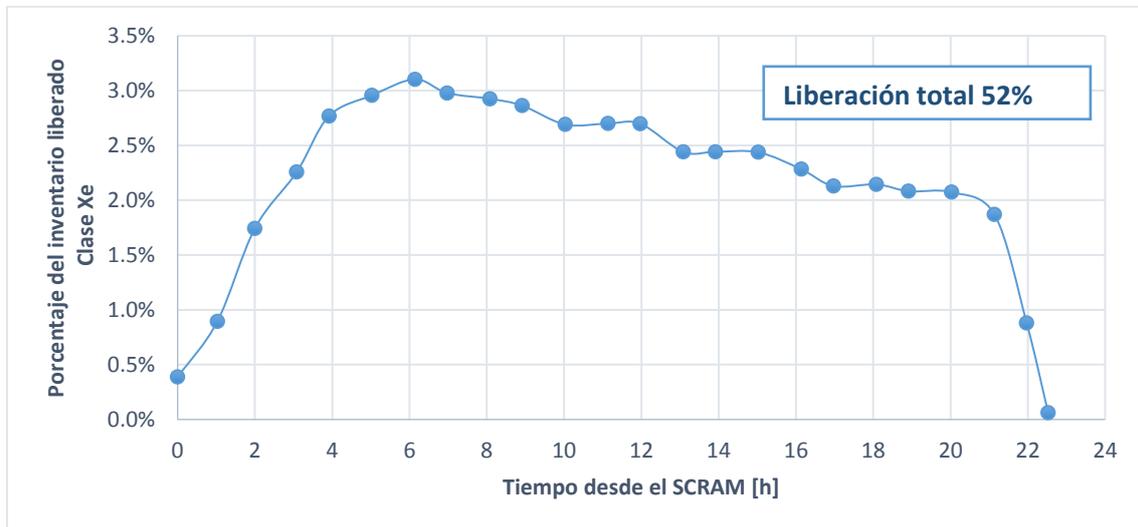


Figura 10. Variación del porcentaje de liberación del inventario de la clase Xe respecto del tiempo para los distintos segmentos de pluma.

Se puede observar que las fracciones de liberación van incrementándose hasta llegar a la máxima en el séptimo segmento de liberación. Pasadas 7 h desde el momento del SCRAM, las fracciones comienzan a disminuir. Este comportamiento es similar para las fracciones de liberación de las otras clases de radionucleidos. En las Figuras 11 y 12 se muestran los gráficos de las clases Cs y I, respectivamente.

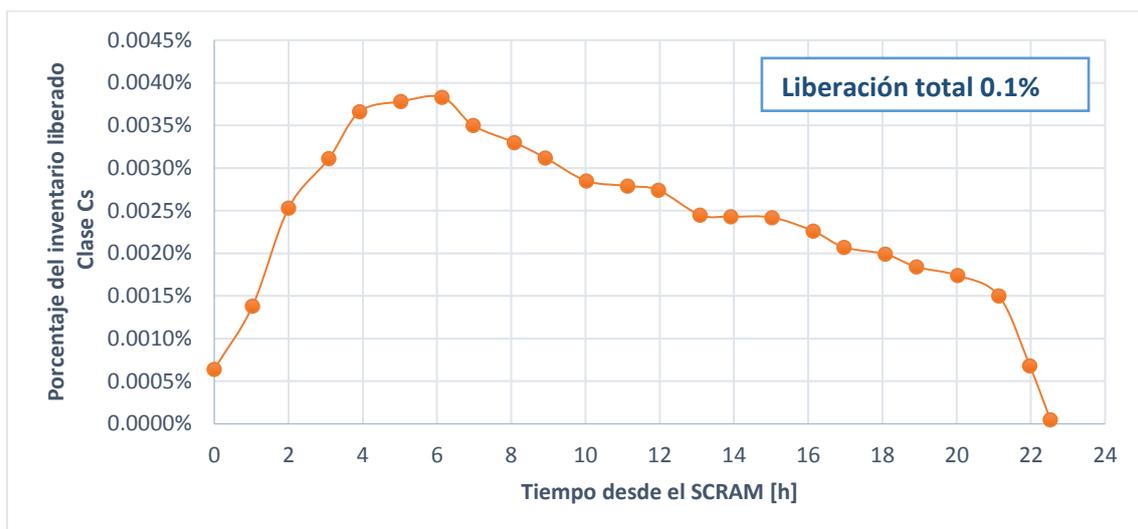


Figura 11. Variación del porcentaje de liberación del inventario de la clase Cs respecto del tiempo para los distintos segmentos de pluma.

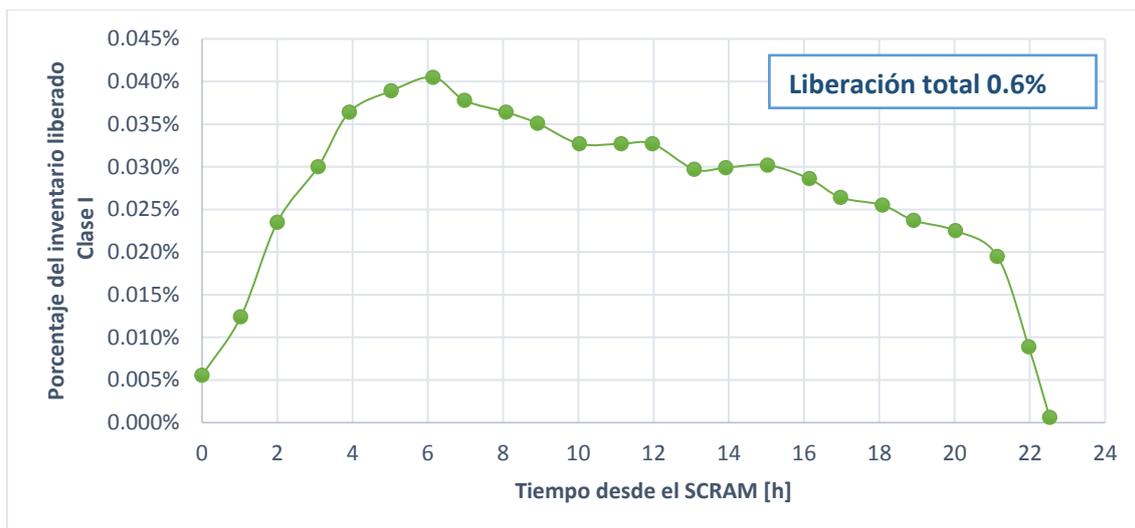


Figura 12. Variación del porcentaje de liberación del inventario de la clase I respecto del tiempo para los distintos segmentos de pluma.

### 6.1.2 Información meteorológica

Las simulaciones se realizaron considerando que el accidente podría ocurrir en cualquier día del año y en cualquier horario, esto permite evaluar todas las posibles consecuencias durante ese año según las distintas condiciones atmosféricas.

Para realizar las simulaciones se utilizó un conjunto de datos meteorológicos reales. Este conjunto de datos contiene mediciones horarias de dirección y velocidad del viento, clase de estabilidad atmosférica de Pasquill, tasa de precipitación y alturas de la capa de mezcla para las distintas estaciones del año.

Para este análisis es importante conocer las características de los vientos, ya que en el Modelo de Pluma Gaussiana el transporte de contaminantes se da en la dirección del viento. En la Figura 13 se muestra la rosa de los vientos realizada a partir de los datos meteorológicos.

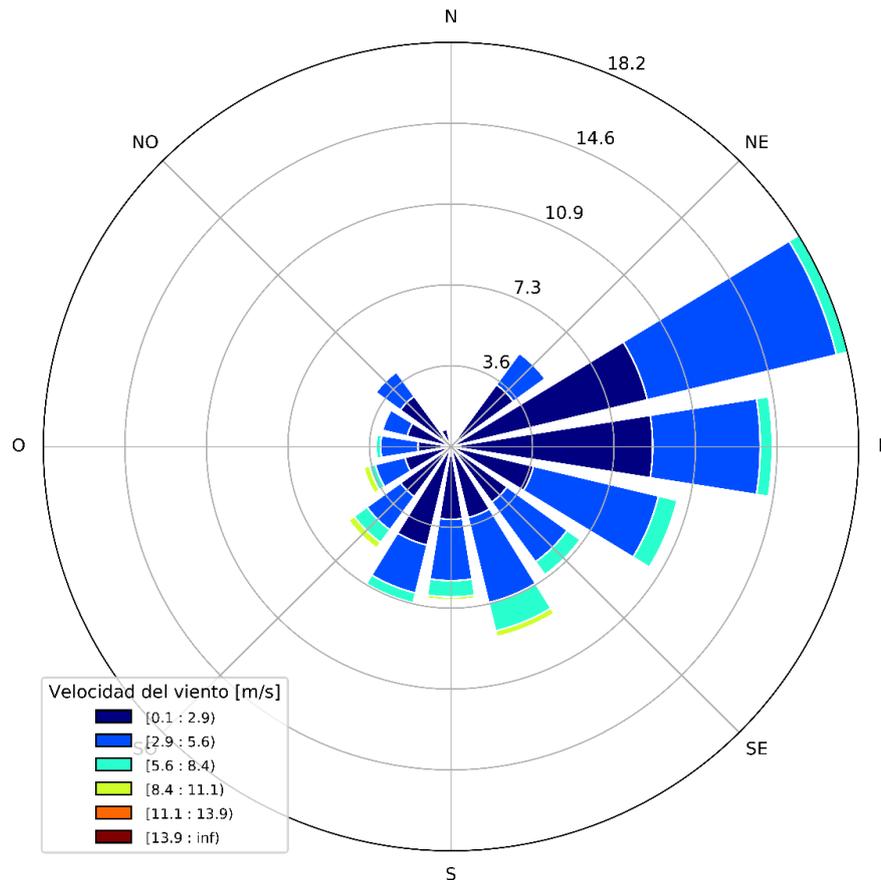


Figura 13. Rosa de los vientos. Fuente: Elaboración propia.

Se puede notar en el gráfico que los vientos predominantes en la zona son los provenientes del ENE.

### 6.1.3 Población y región de análisis

En el estudio original de la NRC, se divide a la población en seis grupos. Para el análisis realizado se consideró que toda la población pertenecía al grupo denominado “Public”.

Se utilizó una distribución de población uniforme de 1 persona-km<sup>-2</sup>. Se estableció que el área poblada comienza a los 0.65 km de distancia al reactor y se analizaron las consecuencias del accidente en un área circular de radio 20.65 km alrededor de la central. Aproximadamente, la población dentro de la zona es de 1350 personas. El área comprendida entre la central y el comienzo de la población no fue estudiada, porque únicamente se busca evaluar el efecto sobre el público y no sobre los trabajadores de la central.

Se definió una fracción del área cubierta por tierra en un 90% y considerando la presencia de un cuerpo de agua en la zona que represente el 10% restante. También se estableció que el 80% del suelo es utilizado para fines agrícolas, esto es importante para el cálculo del impacto económico.

## 7 Resultados

### 7.1 Verificación de la Norma AR 10.1.1

La Norma AR 10.1.1 define la licencia de una instalación nuclear como el documento por medio del cual la ARN autoriza, bajo ciertas condiciones, la operación de una instalación o la construcción, puesta en marcha, retiro de servicio o cualquier otra actividad que la ARN juzgue necesario licenciar.

Sin la licencia otorgada por la ARN, una instalación nuclear no puede estar en funcionamiento. Debido a esto, en primer término, se realizaron las simulaciones necesarias para demostrar que la instalación cumple con el criterio de *RRI* descrito en el apartado de "Evaluación del Riesgo Radiológico Individual". Este implica que, en caso de ocurrir un accidente, el Riesgo Radiológico Individual, definido por la probabilidad de intersección entre el suceso exposición a la radiación ionizante y el suceso fatalidad debido a la exposición, no puede superar el límite establecido de  $1 \times 10^{-07}$  (ARN, 2002).

A partir de ahora nos referiremos al Riesgo Radiológico Individual, como *RRI* o como riesgo, de manera indistinta.

Es importante destacar que, según la Norma mencionada, para otorgar el licenciamiento, el *RRI* debe ser calculado para un período de 24 h posteriores al momento en que se da aviso a la población sobre el accidente y no se debe tener en cuenta la aplicación de contramedidas.

Se obtuvo, para toda el área de análisis, un  $RRI_{máx}$  dos órdenes de magnitud menor al límite establecido por ARN ubicado a 0.8 km de la central, en un ángulo aproximado de  $238^\circ$  (siendo  $0^\circ$  el norte) correspondiente a la dirección OSO. La central cumple con el límite de *RRI*. En la Figura 14 se muestra un gráfico con las curvas de iso-riesgo relativo obtenidas en esta simulación.

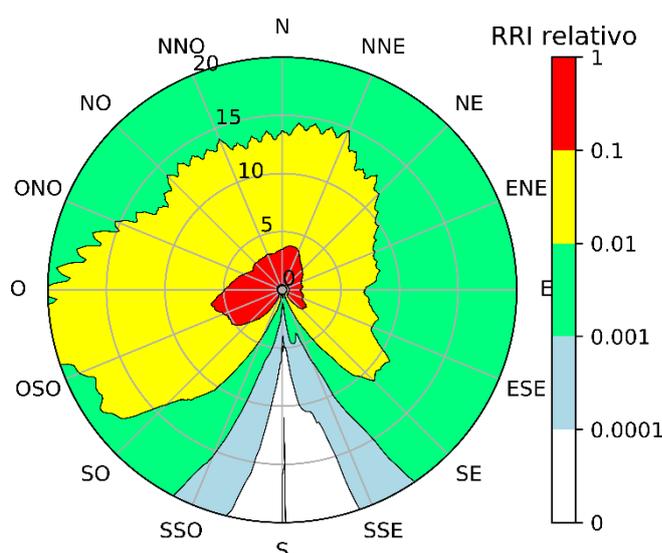


Figura 14. *RRI* relativo en el área de estudio calculado para el licenciamiento de la central. Nota: el *RRI* relativo se calculó dividiendo los valores de *RRI* obtenidos por el  $RRI_{máx}$ .

Al sur de la central, el *RRI* relativo es menor que en el resto del área. Esto se debe a que los vientos provenientes del norte, como puede observarse en la rosa de los vientos, son muy

poco frecuentes en el área de estudio, lo que hace que la probabilidad de exposición sea muy baja. Los mayores valores de *RRI* relativo se encuentran en un área alrededor de la central con un radio de 5 km. En el área de radio 10 km se encuentran mayormente valores de *RRI* relativo superiores 0.01. La forma dentada que se observa se debe a la malla espacial utilizada (64 sectores) y al método utilizado por WinMACCS para realizar el cálculo de la concentración en la línea central de la pluma

## 7.2 Análisis de la variación de *RRI* mediante la aplicación de contramedidas

Como se mencionó anteriormente, los objetivos de este proyecto comprenden el análisis de las variaciones en el *RRI* mediante la aplicación de contramedidas y la evaluación de su impacto económico.

Para esto fue necesario considerar que la aplicación de contramedidas puede demorarse más de 24 h, por lo tanto, para los siguientes análisis se redefinió el tiempo de exposición utilizado para el cálculo del *RRI* (24 h) a una semana. El valor obtenido no se comparó con un límite, ya que no está establecido para este tiempo de exposición, sino que se evaluó la variación respecto al escenario donde no se aplican contramedidas.

Las contramedidas que se consideraron para el análisis son:

- ✓ Refugio
- ✓ Evacuación
- ✓ Relocalización
- ✓ Suministro de pastillas de yoduro de potasio (KI).

En la Tabla 3 se muestran los factores de blindaje correspondientes al grupo “Public” utilizados para calcular las dosis según la actividad realizada y la vía de exposición:

- ✓ CSFACT representa la protección contra la radiación recibida directamente de la pluma
- ✓ PROTIN representa la protección contra la radiación recibida por inhalación
- ✓ SKPFAC representa la protección contra la radiación recibida a través del material depositado en la piel
- ✓ GSHFAC representa la protección contra la radiación recibida a través del material depositado en el suelo
- ✓ BRRATE representa la tasa de respiración en  $m^3 \cdot s^{-1}$ .

Tabla 3.

*Factores de blindaje y tasa de respiración para las distintas actividades.*

Actividad	CSFACT	PROTIN	SKPFAC	GSHFAC	BRRATE
Normal	0.68	0.46	0.46	0.26	$2.66 \times 10^{-04}$
Evacuación	1	0.98	0.98	0.5	$2.66 \times 10^{-04}$
Refugio	0.6	0.33	0.33	0.2	$2.66 \times 10^{-04}$

Nota: un factor de blindaje igual a cero, implica la protección total contra las radiaciones ionizantes. Fuente: Sandia National Laboratories (2012).

Actividad normal implica que la rutina de los individuos no se modifica por la ocurrencia del accidente.

Se puede observar que, durante la evacuación, el blindaje es menor que en las otras dos actividades. Esto se debe a que las personas deben desplazarse de un lugar al otro y se encuentran más expuestas. Igualmente, se realiza la evacuación con el fin de disminuir el tiempo de exposición.

Para comparar el efecto de las contramedidas se utilizaron los gráficos realizados mediante el código de Python desarrollado. También se estudió el  $RRI_{máx}$ , su ubicación en el área y la disminución del mismo respecto al escenario sin aplicación de contramedidas en la fase de emergencia.

Primero, se realizó la simulación para una semana de un escenario en el que no se aplican contramedidas durante la fase de emergencia. Esta simulación se utilizó como base para comparar las variaciones del  $RRI$  con las contramedidas.

Luego, se simuló la aplicación de las distintas contramedidas de manera individual y de manera progresiva. Los distintos escenarios evaluados se detallan a continuación.

- Caso 0- Sin aplicación de contramedidas
- Contramedidas aplicadas de manera individual
  - Caso 1- Refugio
  - Caso 2- Evacuación
  - Caso 3- Relocalización
  - Caso 4- Suministro de pastillas de yoduro de potasio
- Contramedidas aplicadas progresivamente
  - Caso 5- Refugio
  - Caso 6- Refugio y evacuación
  - Caso 7- Refugio, evacuación y relocalización
  - Caso 8- Refugio, evacuación, relocalización y suministro de pastillas de yoduro de potasio

#### 7.2.1.1 Caso 0- Sin aplicación de contramedidas

El  $RRI_{máx}$  hallado se ubica a 0.8 km de la central, en un ángulo de 238° (sector OSO), al igual que en el análisis del licenciamiento.

En la Figura 15 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para el Caso 0.

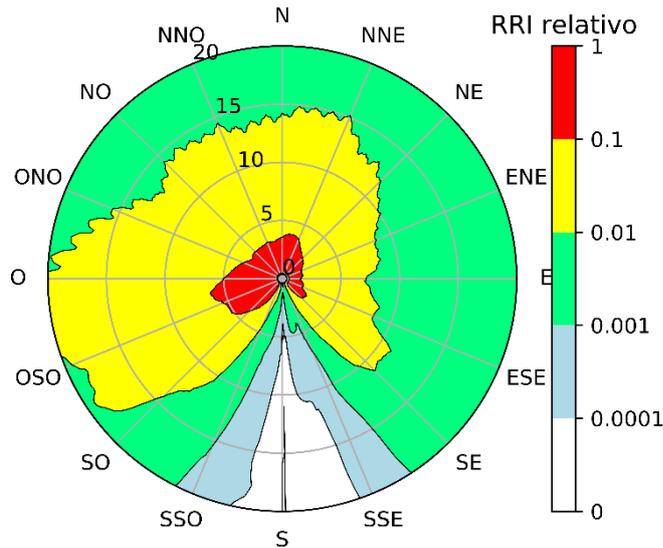


Figura 15. Curvas de iso-riesgo relativo sin aplicación de contramedidas, Caso 0.

La forma de las curvas, al igual que para el Licenciamiento, concuerda con lo observado en la rosa de los vientos. Los vientos predominantes provienen del ENE y afectan el sector OSO de la grilla y es en este sector que se dan los mayores valores de *RRI*. Esto se debe a que, en el cálculo del *RRI* (Ecuación 4), la probabilidad de exposición en este sector será mayor que en el resto del área.

En la Figura 16 se muestran los valores máximos de dosis relativa que se pueden obtener en el dominio. Los valores máximos se determinaron considerando que el accidente ocurra en cualquiera de las 8760 condiciones meteorológicas posibles durante el año de estudio.

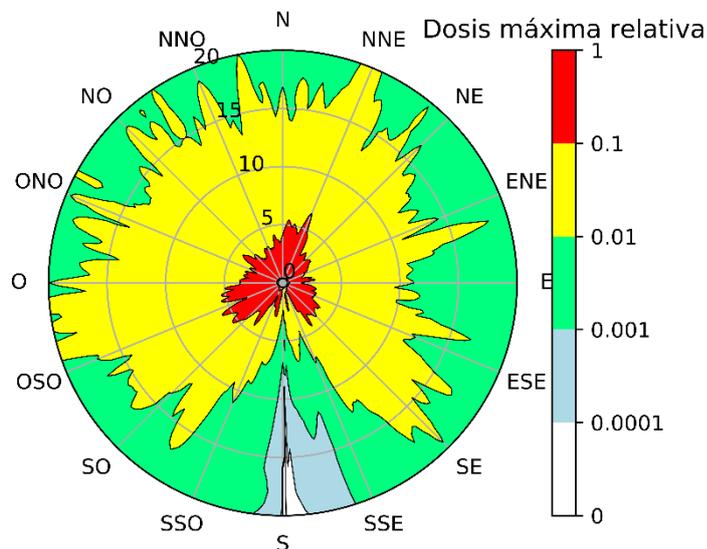


Figura 16. Curvas de iso-dosis máxima relativa sin aplicación de contramedidas, Caso 0. Nota: la dosis máxima relativa se calculó dividiendo los valores de dosis máxima obtenidos por el valor máximo obtenido en todo el dominio.

Las curvas observadas en la Figura 16 no se asemejan con la rosa de los vientos expuesta en la Figura 13. Esto se debe a que la Figura 16 representa, para cada elemento espacial, el valor máximo de dosis relativa que se puede obtener de los 8760 trials para este caso y no considera la frecuencia de ocurrencia de las distintas condiciones meteorológicas.

Al analizar las Figuras 15 y 16 se puede ver que, las formas de las superficies de  $RRI$  relativo no coinciden con las de máximas dosis relativas. Esto está relacionado con que las condiciones más adversas pueden no coincidir con las más frecuentes.

## 7.2.2 Contramedidas aplicadas individualmente

Estas medidas de mitigación se aplican sobre todo el área de análisis.

### 7.2.2.1 Caso 1- Refugio

En esta simulación se consideró que toda la población dentro del área de análisis se refugia en sus hogares a las 3 h desde que ocurrió la liberación. Esta medida se mantiene hasta finalizar la semana de fase de emergencia.

El  $RRI_{máx}$  se obtuvo a 0.8 km de la central, en un ángulo de  $238^\circ$  (sector OSO) al igual que en el Caso 0. Este valor corresponde a una disminución del  $RRI_{máx}$  del 23% respecto al escenario sin aplicación de contramedidas.

En la Figura 17 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para este caso.

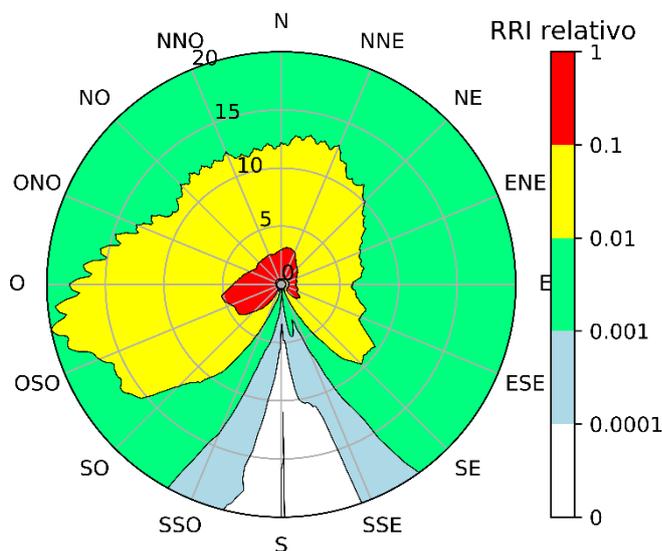


Figura 17. Curvas de iso-riesgo relativo implementando el refugio en todo el dominio, Caso 1.

Se puede observar como las distintas curvas disminuyen sus áreas respecto al Caso 0 (Figura 15) y mantienen la forma original, esto se debe a que la contramedida se aplicó en toda el área de igual manera. En la mayor parte del área de análisis el  $RRI$  relativo es menor al 10% del  $RRI_{máx}$  del Caso 0 (Sin contramedidas). Solo se observan valores de  $RRI$  relativo superiores a 0.1, área roja, dentro del radio de 5 km alrededor de la central.

### 7.2.2.2 Caso 2- Evacuación

Se consideró para esta simulación que toda la población comienza a evacuarse a las 3 h de la liberación. Esta evacuación se da de manera radial para todos los individuos, los mismos deben atravesar todo el dominio hasta salir del radio de 20.65 km, donde ya no están expuestos a la radiación ionizante. Aquellos que al momento de iniciar la evacuación se encuentren más cerca de la central, tendrán tiempos de exposición mayores que los que se encuentren más cerca de los 20.65 km. Los evacuados no regresan a su posición original durante el período analizado.

La evacuación se divide en tres fases. La primera, denominada inicial, comienza en el momento en que se da aviso a la población; coincide con el momento de la liberación y tiene una duración de 15 min. Durante la misma, la velocidad de evacuación es de aproximadamente  $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Finalizada la fase inicial, comienza fase media, que dura cerca de 10 h. En esta fase la velocidad de evacuación es de  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Al finalizar la fase media comienza la fase tardía. Esta fase se extiende hasta finalizar la evacuación y durante la misma la velocidad de evacuación es de aproximadamente  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Sandia National Laboratories, 2012).

El modelado de evacuación realizado para la planta Surry se desarrolló de acuerdo con las características observadas en evacuaciones previas realizadas por incidentes no nucleares. Las velocidades de tres fases se corresponden con la congestión vehicular que se produce durante la evacuación. Los individuos que salen de la zona más temprano experimentan menores retrasos. Los que parten durante la parte media de la evacuación, cuando el mayor número de personas se está desplazando, generalmente experimenta la mayor congestión y retraso. Los evacuados que abandonan la zona más tarde, mientras potencialmente se exponen a mayor riesgo, ingresan a la red de transporte cuando la demanda es menor y no se ven afectados por los retrasos asociados con el período pico de demanda (Sandia National Laboratories, 2012).

El  $RRI_{m\acute{a}x}$  se localizó en un ángulo de  $251^\circ$  y un radio de 0.8 km (sector OSO). Esta ubicación no se corresponde con la del  $RRI_{m\acute{a}x}$  en el Caso 0. La disminución del  $RRI_{m\acute{a}x}$  fue del 74%.

En la Figura 18 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para este caso.

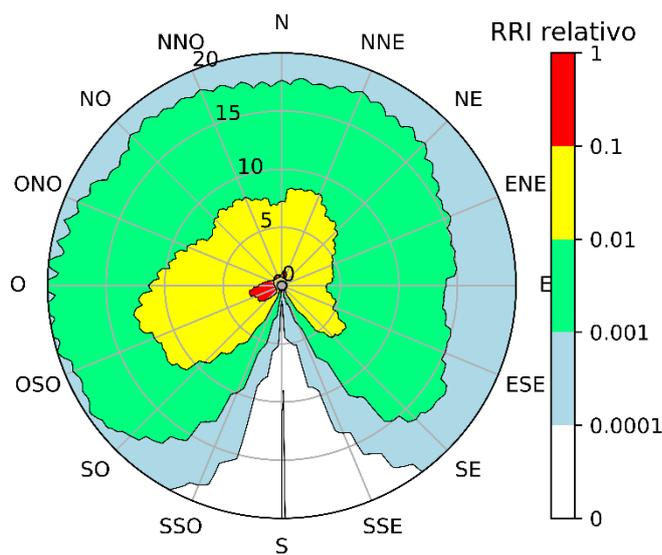


Figura 18. Curvas de iso-riesgo relativo implementando evacuación en todo el dominio, Caso 2.

La Figura 18 muestra como la evacuación generó grandes cambios en el  $RRI$  respecto al Caso 0 (Figura 15). En el Caso 0, se observa que el área amarilla, que comprende  $RRI$  relativos entre 0.01 y 0.1, que antes alcanzaba los 20 km en el oeste, ahora se mantiene casi completamente dentro del radio de 10 km. Para el Caso 2, el  $RRI$  relativo es menor al 1% del  $RRI_{máx}$  del Caso 0 en casi toda el área de análisis. Solo se observan valores de  $RRI$  relativo superiores a 0.1 dentro de un radio aproximado de 3 km alrededor de la central y en la dirección OSO.

### 7.2.2.3 Caso 3- Relocalización

En esta simulación se consideró que toda la población dentro del área de análisis se relocaliza de manera inmediata a un sitio donde no recibe más dosis. La relocalización se da inmediatamente luego de 3 h de la llegada de la pluma en cada elemento espacial, si la dosis efectiva proyectada para una exposición de una semana, supera 0.01 Sv (Sandia National Laboratories, 2012). Este valor sólo debe tomarse como indicativo. Los individuos relocalizados no regresan a su posición original durante la semana analizada.

El  $RRI_{máx}$  se localizó a 0.8 km de la central, en un ángulo de 238° (sector OSO) al igual que en el Caso 0. Este valor corresponde a una disminución del  $RRI_{máx}$  del 94% respecto al escenario sin aplicación de contramedidas.

En la Figura 19 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para este caso.

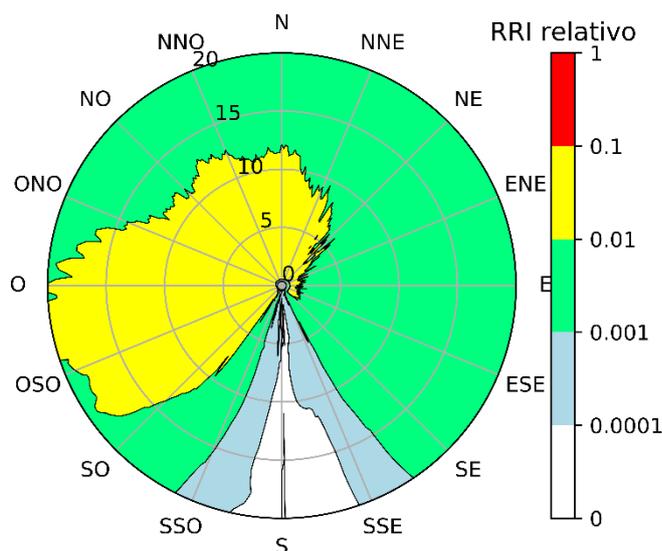


Figura 19. Curvas de iso-riesgo relativo implementando relocalización en todo el dominio, Caso 3.

En la Figura 19 se muestran las curvas de  $RRI$  obtenidas para este caso. Se puede ver que en todo el dominio el  $RRI$  es menor al 10% del  $RRI_{máx}$  del Caso 0 (Sin contramedidas). Además, el área amarilla, que comprende valores de  $RRI$  relativo entre 0.01 y 0.1, cambió su forma. Esto se debe a que el viento es predominante del este, haciendo que los individuos del oeste tengan más probabilidades de llegar a 0.01 Sv o hasta superarlo y sean relocalizados.

Los cambios observados a partir de la implementación de la relocalización son más evidentes, respecto a los casos anteriores, debido a que se limitó la dosis a la cual pueden llegar a estar expuestos los individuos. Igualmente, puede haber personas cuya dosis sea mayor al

límite establecido. Esto se debe a que, al momento de la relocalización (3 h luego de la llegada de la pluma), la población ya estuvo expuesta a la radiación y puede presentar dosis efectivas mayores al límite. Lo que se logró con la relocalización fue que la dosis no continuara aumentando.

#### 7.2.2.4 Caso 4- Suministro de KI

Para este caso se supuso que se le entregaba pastillas de yoduro de potasio (KI) al 50% de la población presente en el área de estudio. Además, se consideró que esta medida tenía una eficacia del 70% (Sandia National Laboratories, 2012).

Se obtuvo el  $RRI_{máx}$  a 0.8 km de la central, en un ángulo de  $238^\circ$  (sector OSO) al igual que en el Caso 0. Este valor corresponde a una disminución del  $RRI_{máx}$  del 13% respecto al escenario sin aplicación de contramedidas.

En la Figura 20 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para este caso.

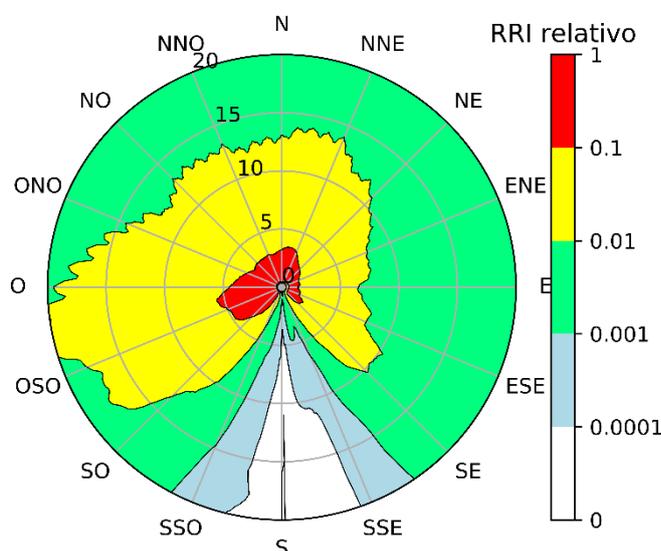


Figura 20. Curvas de iso-riesgo relativo suministrando KI en todo el dominio, Caso 4.

En este caso, las curvas disminuyen sus áreas en menor medida que en todos los casos anteriores y son muy similares a las del Caso 0 (Sin contramedidas) presentadas en la Figura 15.

Si bien no se observan grandes diferencias en el  $RRI$  respecto al Caso 0, esta medida de mitigación produce una disminución significativa en la incidencia de cáncer de tiroides.

En este ejemplo, sin el suministro de KI, WinMACCS calculó una incidencia de cáncer de tiroides de 1 caso cada 200 mil personas aproximadamente. Suministrando KI, la incidencia fue de 1 caso cada 300 mil personas aproximadamente.

Según un estudio sobre el cáncer de tiroides realizado en la provincia de Río Negro, durante el período 2004-2013, la incidencia del mismo es de 1 caso cada 16500 personas aproximadamente (Palmero et al., 2016). Al comparar este dato con los resultados obtenidos, para este caso académico, los valores calculados no podrían distinguirse respecto de la tasa normal de cáncer de tiroides.

### 7.2.2.5 Resumen

La Figura 21 muestra los valores de  $RRI_{m\acute{a}x}$  relativos obtenidos para los casos descritos anteriormente, aplicando las medidas de mitigaci3n individualmente.

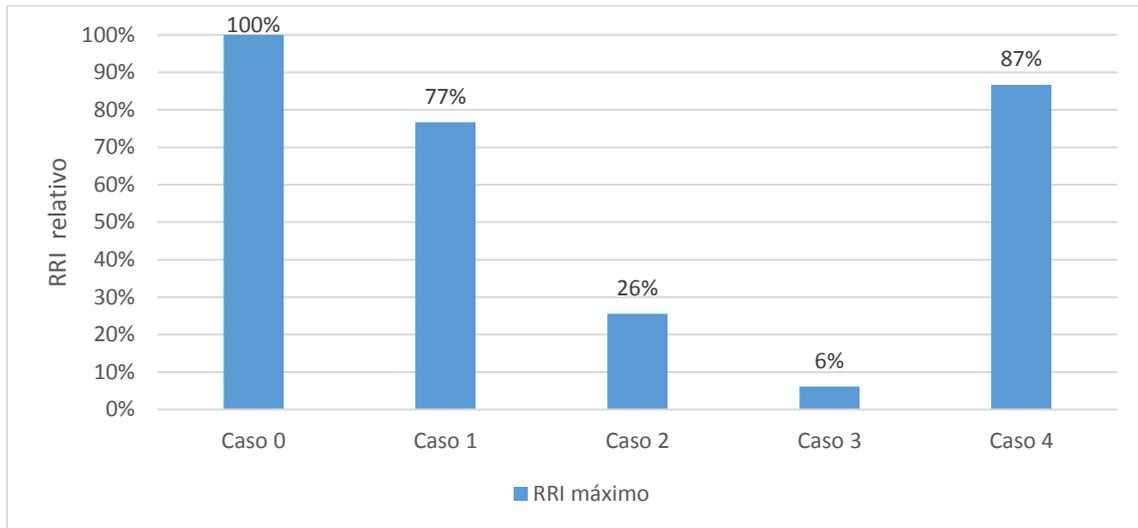
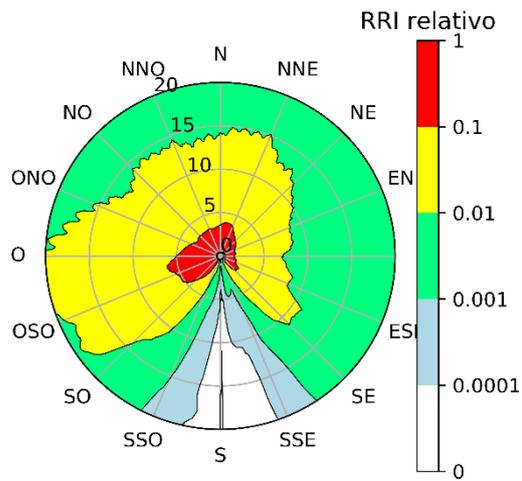


Figura 21. M3ximo  $RRI$  relativo para los distintos casos. Nota: los valores corresponden al  $RRI_{m\acute{a}x}$  de cada Caso dividido por el  $RRI_{m\acute{a}x}$  del Caso 0 (Sin aplicaci3n de contramedidas).

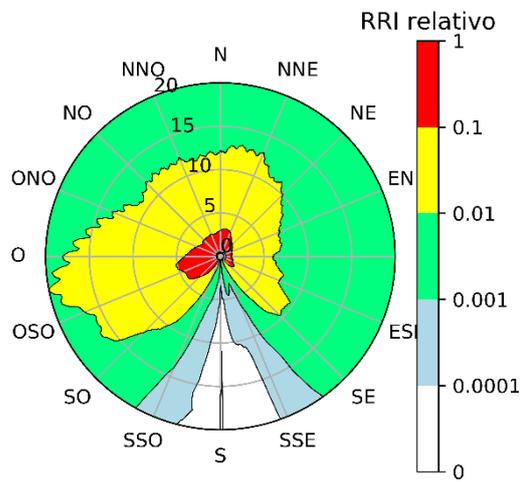
Se puede observar en la Figura 21 que todas las contramedidas aplicadas lograron disminuir el  $RRI_{m\acute{a}x}$ . El escenario que contempla la relocalizaci3n en todo el dominio (Caso 3) logr3 la mayor disminuci3n del  $RRI_{m\acute{a}x}$ , seguido por el escenario de evacuaci3n en todo el dominio (Caso 2). La medida menos efectiva fue el suministro de pastillas de KI (Caso 4), esto se debe a que 3nicamente incide en los efectos de la radiaci3n sobre la tiroides.

En la Figura 22 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para cada una de las distintas contramedidas aplicadas de manera individual y sobre todo el dominio.

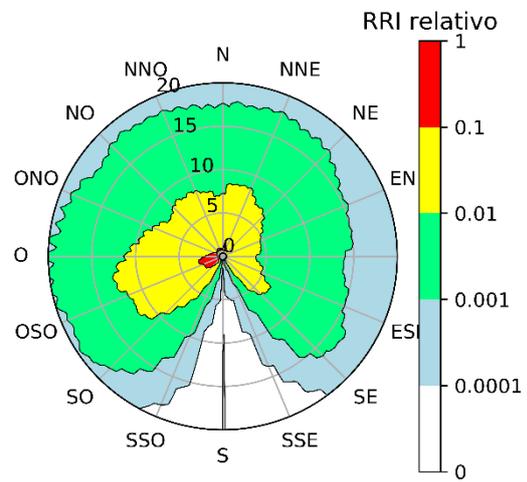
Caso 0: Sin contramedidas



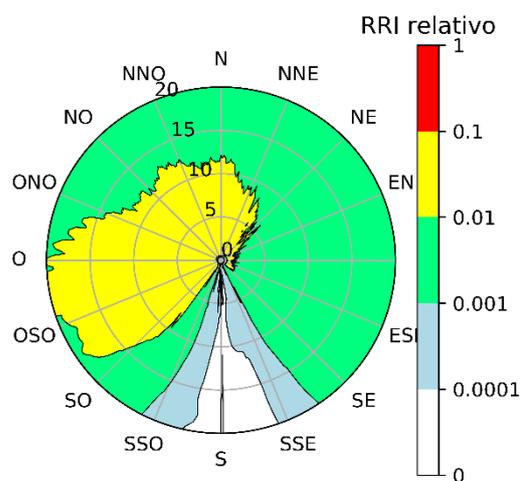
Caso 1: Refugio



Caso 2: Evacuación



Caso 3: Relocalización



Caso 4: Suministro de KI

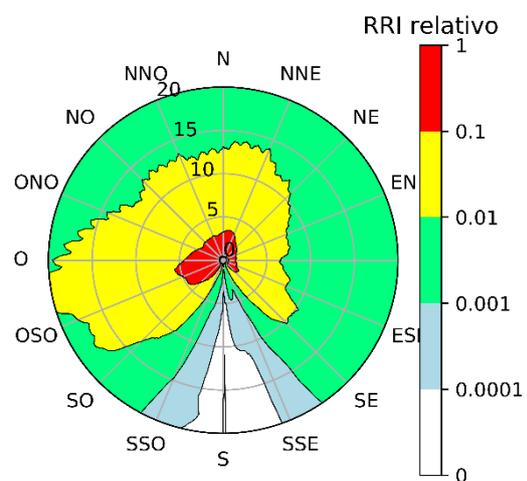


Figura 22. Curvas de iso-riesgo relativo para los distintos casos analizados.

### 7.2.3 Contramedidas aplicadas de manera progresiva

Nuevamente se tomó como base para la comparación el Caso 0, donde no se aplican contramedidas. Para este análisis también se calculó el  $RRI$  para una semana de exposición.

En este caso las contramedidas fueron aplicadas de manera progresiva comenzando por el refugio y finalizando con la implementación de las cuatro a la vez. Las medidas de mitigación no se aplicaron en toda el área, sino que fueron aplicadas por sectores.

#### 7.2.3.1 Caso 5- Refugio hasta 10 km

En este caso se consideró que la población presente en un área alrededor de la central de radio menor a 10 km se refugia en sus hogares. El refugio comienza a los 9900 s desde la liberación y finaliza al concluir la semana (Sandia National Laboratories, 2012). Fuera de los 10 km la población continúa con sus actividades normalmente.

El  $RRI_{máx}$  se encontró a 0.8 km de la central, en un ángulo de  $238^\circ$  (sector OSO), coincidiendo con la ubicación del  $RRI_{máx}$  en el Caso 0. Este representa una disminución del 23%.

En la Figura 23 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para este caso.

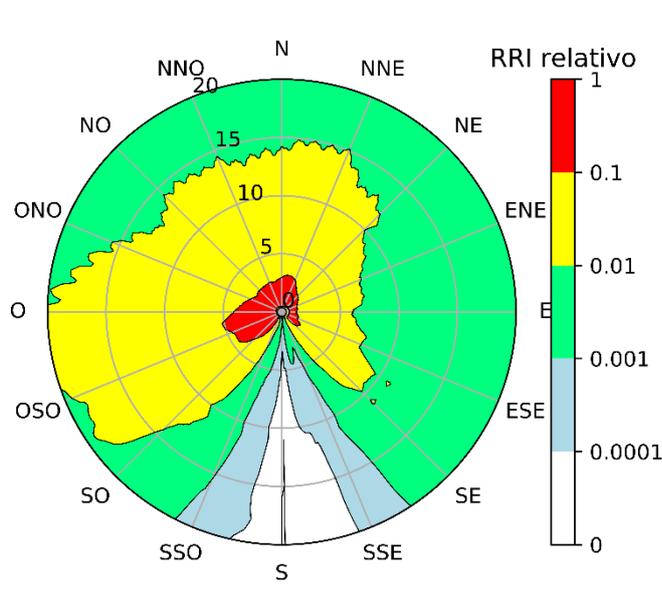


Figura 23. Curvas de iso-riesgo relativo implementando refugio hasta 10 km, Caso 5.

Al comparar la Figura 23 con la Figura 15 (Caso 0), se puede observar que solo se produjeron cambios dentro del área de 10 km, como era de esperarse. En la mayor parte del área de análisis el  $RRI$  es menor al 10% del  $RRI_{máx}$  del Caso 0 (Sin contramedidas). Solo se observan valores de  $RRI$  relativo superiores a 0.1 hasta un radio de a 5 km alrededor de la central.

#### 7.2.3.2 Caso 6- Refugio y evacuación hasta 10 km

Para este caso, se trató el refugio como en el Caso 5, pero con la diferencia que luego de 1 h de refugio la población comienza a evacuarse. La evacuación comprende a la población dentro de los 10 km e implica que la misma se desplace hasta fuera de los 20.65 km. Una vez alcanzado este radio, los individuos permanecen allí hasta finalizar la semana de estudio y se considera que ya no reciben más dosis. La población que ocupa radios mayores a 10 km continúa con sus actividades normalmente.

El  $RRI_{m\acute{a}x}$  se obtuvo a 0.8 km de la planta en un ángulo de 251°. Este corresponde con una disminución del  $RRI_{m\acute{a}x}$  del 83% respecto al Caso 0.

En la Figura 24 se muestra los  $RRI$  relativos obtenidos en el área de estudio para este caso.

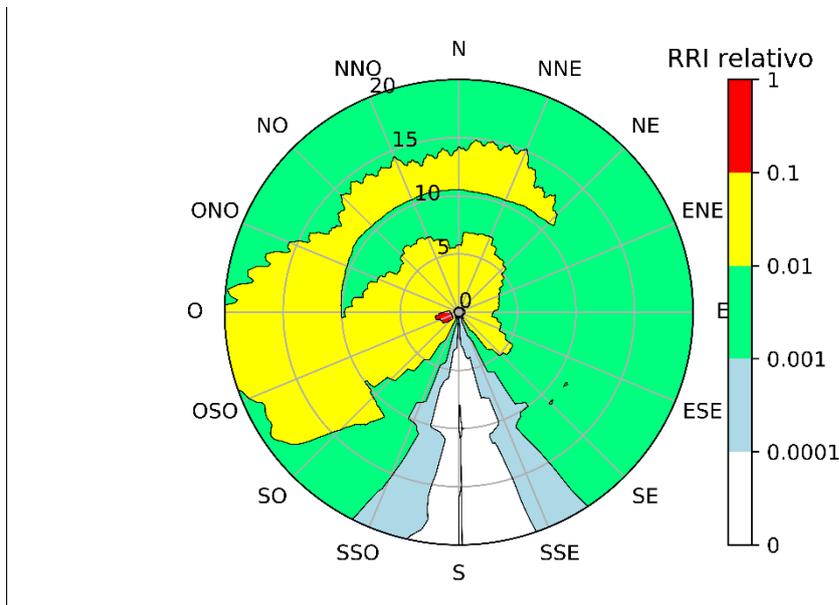


Figura 24. Curvas de iso-riesgo relativo implementando refugio y evacuación hasta 10 km, Caso 6.

Nuevamente, como era de esperarse, solo se produjeron cambios dentro del área de 10 km. Los pequeños cambios cerca del radio de 10 km se deben a las interpolaciones que realiza el código a la hora de graficar las superficies de nivel. En esta simulación solo se encuentran valores de  $RRI$  relativo superiores a 0.1 hasta un radio de aproximadamente 2 km alrededor de la central en la dirección hacia donde sopla el viento predominante (OSO).

Además, se observa que, implementar la evacuación luego del refugio incrementó las variaciones en el  $RRI$  relativo respecto a solo implementar refugio. Esto puede verse al comparar las Figuras 23 y 24.

### 7.2.3.3 Caso 7- Refugio, evacuación y relocalización

En esta simulación se consideró el refugio y la evacuación del mismo modo que en la anterior. A estas medidas se le sumó la relocalización.

La relocalización se da en los sectores que se encuentran a más de 10 km de la central. En este caso se utilizaron dos criterios de dosis para la relocalización. Los individuos cuya dosis efectiva proyectada para una exposición de una semana sea mayor o igual a 0.05 Sv, se relocalizarán luego de 24 h de la llegada de la pluma. Aquellos cuya dosis proyectada sea mayor o igual a 0.01 Sv, se relocalizarán luego de 36 h de la llegada de la pluma. Esta acción se realiza en dos etapas y en función de dos dosis, para priorizar aquellos que, de no relocalizarse, recibirían mayores dosis. Estos dos criterios se definieron siguiendo la bibliografía de NRC (Sandia National Laboratories, 2012).

El  $RRI_{m\acute{a}x}$  se localizó a 0.8 km de la planta, en un ángulo de 251°. Este valor corresponde a una disminución del 83% del  $RRI_{m\acute{a}x}$  calculado para el Caso 0.

En la Figura 25 se muestran las curvas de *RRI* relativo obtenidas para el Caso 7.

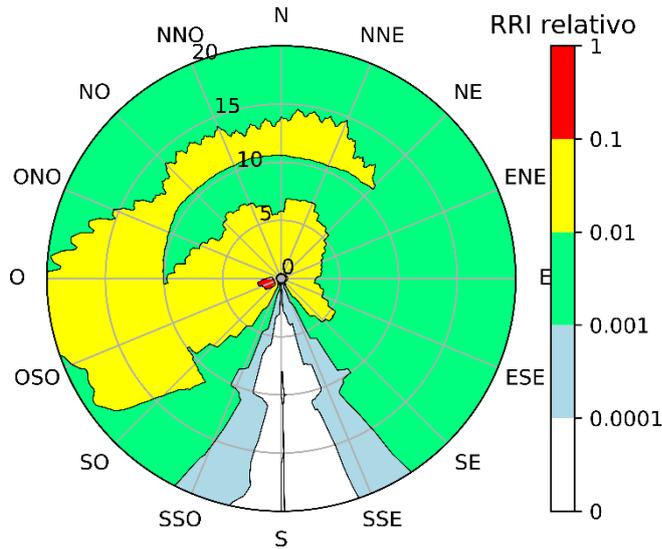


Figura 25. Curvas de iso-riesgo relativo implementando refugio y evacuación hasta 10 km y relocalización fuera de este radio, Caso 7.

Dentro del área de radio de 10 km se produjeron los mismos cambios respecto al análisis sin contramedidas que en el Caso 6, dado que se aplicó refugio y evacuación de igual modo. La diferencia se observa fuera de este radio, donde el área amarilla, que representa *RRI* relativos entre 0.01 y 0.1, se redujo.

#### 7.2.3.4 Caso 8- Refugio, evacuación, relocalización y suministro de pastillas de KI.

En esta simulación se consideró el refugio, la evacuación y la relocalización del mismo modo que en la anterior. A estas medidas se le sumó el suministro de KI.

Se supuso que se le entregaba pastillas de yoduro de potasio al 50% de la población presente en el área de estudio. Además, se consideró que esta medida tenía una eficacia del 70% (Sandia National Laboratories, 2012).

Se obtuvo el  $RRI_{máx}$  en un ángulo de  $251^\circ$  y un radio de 0.8 km, correspondiente a una disminución del 85%.

En la Figura 26 se muestran las curvas de *RRI* relativo obtenidas para este caso.

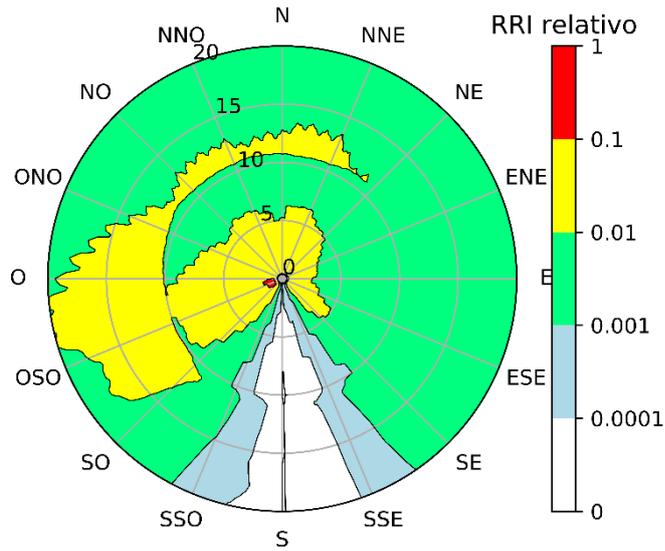


Figura 26. Curvas de iso-riesgo relativo suministrando pastillas de KI, implementando refugio y evacuación hasta 10 km y relocalización fuera de este radio, Caso 8.

Se observa en la Figura 26 como el  $RRI$  relativo se redujo en casi toda el área a valores inferiores al 0.1 del  $RRI_{máx}$  obtenido sin aplicación de contramedidas. Las superficies presentadas en la Figura 26 son similares en aspecto a las del Caso 7 (Figura 25), pero más pequeñas.

### 7.2.3.5 Resumen

En la Figura 27 se muestran los valores de  $RRI_{m\acute{a}x}$  relativos obtenidos para los casos descritos anteriormente, aplicando contramedidas de manera progresiva.

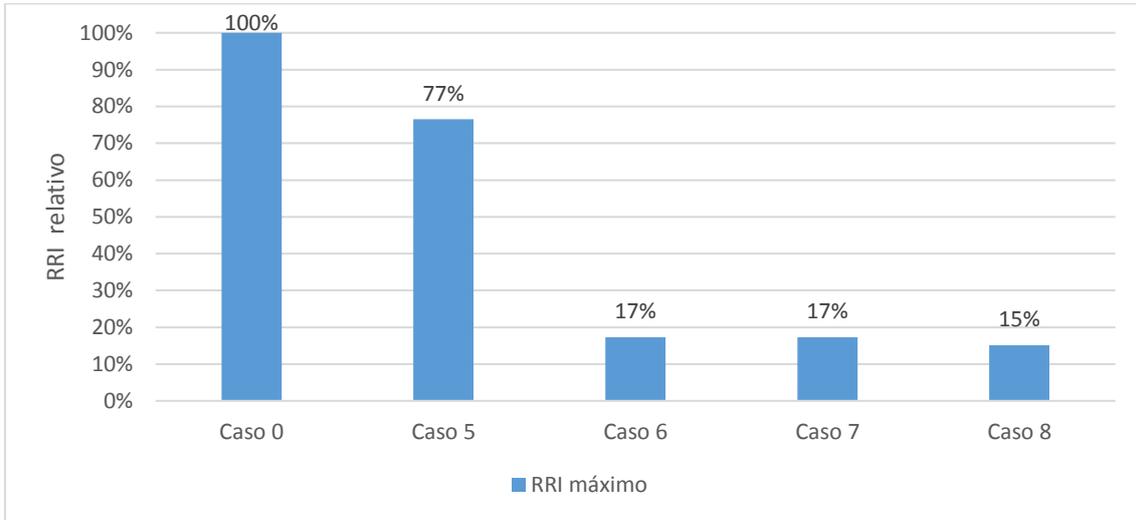


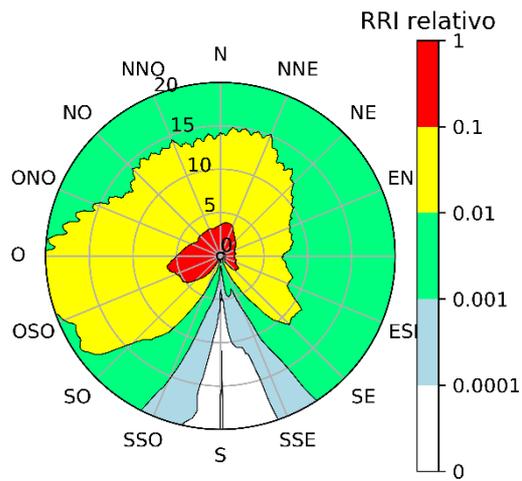
Figura 27. Máximo  $RRI$  para los distintos casos. Nota: los valores corresponden al  $RRI_{m\acute{a}x}$  de cada Caso dividido por el  $RRI_{m\acute{a}x}$  del Caso 0 (Sin aplicación de contramedidas).

Se puede observar en la Figura 27 que todas las medidas de mitigación implementadas lograron disminuir el  $RRI_{m\acute{a}x}$ . Se puede observar cómo disminuyen los valores de  $RRI$  relativo al incrementarse las medidas de mitigación aplicadas.

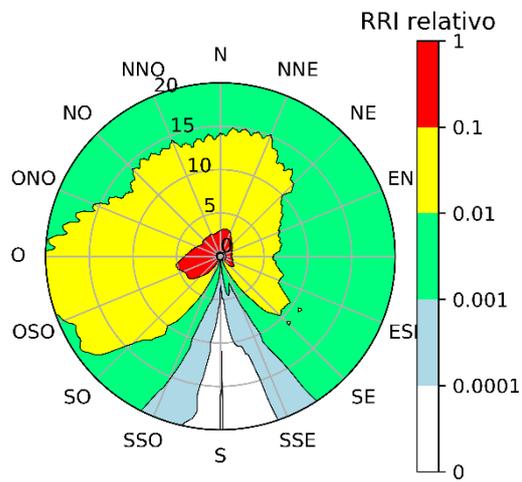
El menor efecto lo tuvo el Caso 5, en el cual se realiza únicamente el refugio de las personas dentro del área de 10 km de radio alrededor de la central. El Caso 8 logró la mayor disminución del  $RRI$ . Ambos resultados coinciden con lo que se esperaba, debido a que en este Caso se aplicaron todas las contramedidas. Sin embargo, el suministro de KI no genera un efecto tan notorio, pues solamente incide en los efectos de la radiación sobre la tiroides.

En la Figura 28 se muestran las curvas de  $RRI$  relativo obtenidas para cada uno de los casos analizados.

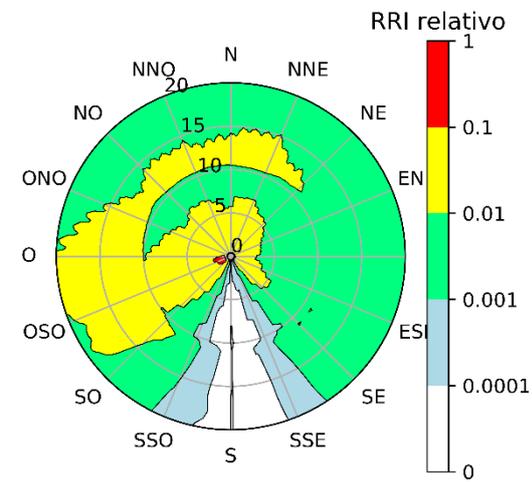
Caso 0: Sin Contramedidas



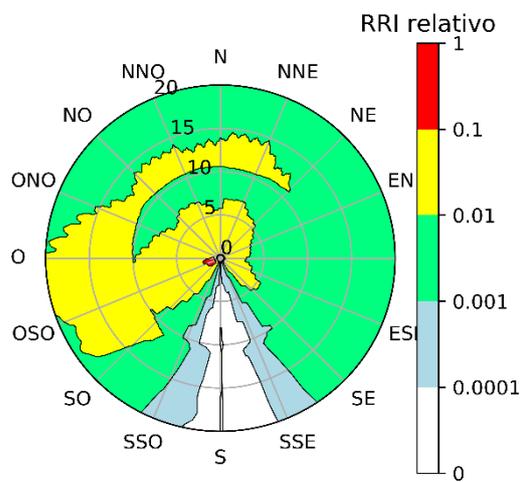
Caso 5: Refugio hasta 10 km



Caso 6: Refugio y evacuación



Caso 7: Refugio, evacuación y relocalización



Caso 8: Refugio, evacuación, relocalización y KI

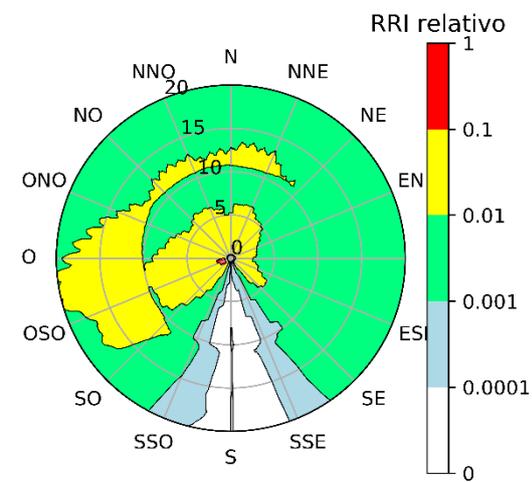


Figura 28. Curvas de iso-riesgo relativo para los distintos casos analizados.

### 7.3 Análisis económico

Como se mencionó anteriormente, WinMACCS permite evaluar los costos de la aplicación de las medidas de mitigación, diferenciando los de las acciones de protección durante la fase de emergencia (Ecuación 6) de los de las acciones de protección durante el largo plazo (Ecuación 7). El costo total comprende la suma de los costos de ambas fases.

Se analizó el impacto económico de las contramedidas descritas anteriormente. Los costos que se muestran en las Tablas 4, 5 y 6, corresponden a los valores medios que se obtuvieron considerando que el accidente puede ocurrir en cualquier momento del año. Si el evento se da de manera tal que se obtienen las peores consecuencias, el costo de remediación del ambiente será mayor que el valor presentado en las Tablas 4, 5 y 6. Este evento tendrá una probabilidad de ocurrencia menor que la del evento del costo medio.

Para el análisis económico de la fase de emergencia se consideró que las medidas de refugio y suministro de pastillas de KI no representan un costo, mientras que la evacuación y la relocalización cuestan 172 USD·persona<sup>-1</sup>·día<sup>-1</sup> (Sandia National Laboratories, 2012).

#### 7.3.1 Contramedidas en el largo plazo

La Tabla 4 detalla los costos de las medidas de mitigación a largo plazo que se aplicaron en todos los casos de igual manera.

Tabla 4.

*Costo de la implementación de las medidas de mitigación a largo plazo.*

Medida de mitigación	Costo [miles de USD]
Remediación de propiedades no agrícolas	15
Remediación de propiedades agrícolas	224
Interdicción de propiedades no agrícolas	49
Interdicción de propiedades agrícolas	18900
Expropiación de propiedades no agrícolas	0
Expropiación de propiedades agrícolas	0
Desechar leche	1480
Desechar cultivos	46400

Los mayores costos en el largo plazo corresponden a desechar los cultivos agrícolas y a la interdicción de propiedades. Se puede observar que no fue necesario expropiar propiedades, esta medida únicamente se toma cuando el costo de la remediación supera ampliamente el valor de las propiedades.

#### 7.3.2 Contramedidas aplicadas individualmente

La Tabla 5 muestra los costos totales y los costos de la fase de emergencia resultantes de la aplicación de contramedidas de manera individual.

Tabla 5.

*Costo de la implementación de medidas de mitigación individualmente.*

	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Costo total (emergencia + largo plazo) [miles de USD]	67200	67200	67900	67200	67200
Costo fase de emergencia [miles de USD]	0	0	719	57	0

Los costos durante la emergencia son bajos en comparación con los costos a largo plazo (Tabla 4), por eso no se ve reflejada una gran variación en el costo total.

Según lo expuesto en la Tabla 5, el costo de emergencia del Caso 2 es mayor que el del Caso 3, a pesar de costar lo mismo evacuar o relocalizar a un individuo. Esto se debe a que la evacuación se realiza en todo el dominio y para toda la población, mientras que la relocalización se realiza en todo el dominio, pero siguiendo un criterio de dosis. De esto se deduce que son menos los individuos relocalizados que los evacuados.

### 7.3.3 Contramedidas aplicadas de manera progresiva

La Tabla 6 muestra los costos totales y los costos de la fase de emergencia resultantes de la aplicación de contramedidas de manera progresiva.

Tabla 6.

*Costo de la implementación de medidas de mitigación de manera progresiva.*

	Caso 0	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Costo total (emergencia + largo plazo) [miles de USD]	67200	67200	67300	67400	67400
Costo fase de emergencia [miles de USD]	0	0	196	204	201

Como se mencionó anteriormente, los costos durante la emergencia no generan una gran variación en el costo total. Los costos de las contramedidas a largo plazo son, nuevamente, los detallados en la Tabla 4, y son lo dominantes.

Al aplicar las contramedidas de manera progresiva, los costos se van adicionando al pasar de un caso al otro. El costo de evacuación de 196 mil USD está incluido también en los Casos 7 y 8. En particular en este último caso se observa una reducción en el costo respecto del Caso 7. Suministrar pastillas de KI no representa un costo en sí, pero su implementación generó cambios en el costo de la etapa de emergencia, que al adicionar la medida de mitigación del KI se redujo el costo en 3 mil USD. El cambio se debe a que, al aplicar esta medida, se redujo la población que superaba el criterio de dosis para la relocalización, disminuyendo así los costos.

## 7.4 Análisis integral

Para comparar tanto la efectividad de las contramedidas como su costo, se creó el Índice de reducción del  $RRI$ . Este índice representa la inversión realizada por unidad porcentual de  $RRI_{máx}$  reducida. La Ecuación 8 muestra el cálculo del índice.

$$\text{Índice de reducción del } RRI = \frac{\text{Costo}_i}{\frac{RRI_{máx,0} - RRI_{máx,i}}{RRI_{máx,0}}} \quad (8)$$

Donde  $\text{Costo}_i$  representa el costo de la implementación de las contramedidas en la fase de emergencia del Caso  $i$ ,  $RRI_{máx,0}$  es el  $RRI_{máx}$  del Caso 0, Sin aplicación de contramedidas, y  $RRI_{máx,i}$  es el  $RRI_{máx}$  del Caso  $i$ . Un índice más bajo implica una mayor disminución del  $RRI_{máx}$  a un menor costo.

La Tabla 7 muestra los índices de reducción del  $RRI$  para los distintos Casos analizados.

Tabla 7.  
Índice de reducción del  $RRI$ .

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Índice de reducción del $RRI$	0	966	61	0	0	237	247	237

Se puede observar que el Caso 2, Evacuación en todo el dominio, tiene un índice mucho más alto que los otros Casos. El índice de los Casos 1, 4 y 5 es cero porque implican refugio o suministro de KI, medidas que no tienen asignado un costo.

En la Figura 29 se muestran los  $RRI_{máx}$  relativos y los índices de reducción del  $RRI$  obtenidos para todos los casos descriptos anteriormente.

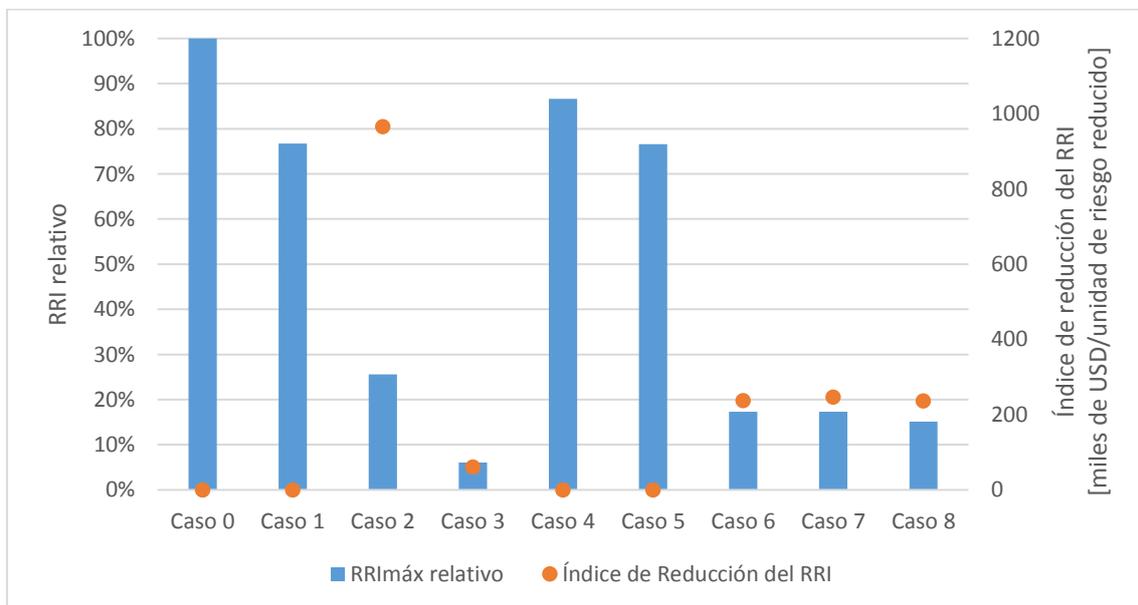


Figura 29.  $RRI$  relativo e índice de reducción del  $RRI$  asociados a la fase de emergencia para cada caso estudiado.

En el Caso 0 el  $RRI$  relativo es 100% y el índice de reducción del  $RRI$  es 0 (cero) debido a que este es el Caso donde no se aplican contramedidas. Los Casos 1 (Refugio), 4 (Suministro de KI) y 5 (Refugio dentro del área de 10 km) generaron una disminución del  $RRI_{máx}$  sin representar

un costo. Esto se debe a que el refugio y el suministro de KI no tienen costos asociados. El índice más alto se obtuvo para el Caso 2, que comprende la evacuación de toda la población.

La contramedida más eficiente fue la Relocalización en todo el dominio (Caso 3), ya que presentó la mayor disminución del  $RRI_{máx}$  y el índice más bajo.

Los Casos 6 (Refugio y Evacuación), 7 (Refugio, evacuación y relocalización) y 8 (todas las contramedidas) representaron los  $RRI$  relativos e índices similares.

## 8 Conclusiones

En el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos técnicos: “Calcular la dispersión del material radiactivo liberado a la atmósfera, durante un hipotético accidente en una central nuclear genérica”, “Calcular el riesgo radiológico relativo en las inmediaciones de la instalación nuclear genérica” y “Calcular el impacto económico relativo de las posibles contramedidas a adoptar para la mitigación de las consecuencias”.

Para cumplir con dichos objetivos se utilizó el código WinMACCS. A través de un Modelo de Pluma Gaussiana, WinMACCS permite calcular la dispersión atmosférica de material radiactivo y las dosis resultantes en el público, así como también estimar el impacto económico de la liberación. Además, fue necesario desarrollar un código mediante el lenguaje de programación Python que permitiera calcular el Riesgo Radiológico Individual, entre otras funcionalidades.

A fin de comprender el funcionamiento de WinMACCS, se realizaron pruebas sencillas en las que se alteró una variable por simulación, de modo tal de poder observar cómo se modificaba la concentración ambiental de actividad. Las variables consideradas fueron: Clase de Estabilidad Atmosférica de Pasquill, vida media de los radionucleidos y la deposición seca.

En cuanto a las Clases de Estabilidad Atmosférica de Pasquill, se analizaron las más características: Inestable (A), Neutra (D) y Estable (F). Con estos ensayos se demostró que, según las condiciones meteorológicas al momento de la liberación, varían las concentraciones y, por lo tanto, las dosis en la población. La clase Estable presentó las concentraciones más altas. En tanto, disminuyó en la Neutra y, más aún, en la Inestable. Esto ocurre porque la dilución del material en la atmósfera es mayor conforme aumenta la inestabilidad.

La vida media de los radionucleidos se estudió mediante el Cs-137, vida media de 30 años; y el I-132, vida media 2.3 h. De ambos radionucleidos se liberó la misma cantidad de actividad,  $3.7 \times 10^{-10}$  Bq. La concentración de I-132 fue siempre menor a la de Cs-137, debido a que, por su corta vida media, decaía durante el viaje de la pluma en la distancia estudiada.

En el estudio de la deposición seca se realizaron dos simulaciones iguales, pero solo en una de estas se consideró la deposición seca. La concentración en aire a nivel del suelo fue similar en ambas simulaciones. Sin embargo, es necesario considerar este proceso para el cálculo de dosis pues el material depositado en suelo puede ser incorporado al organismo a través del consumo de agua o alimentos contaminados y a través de la inhalación por el mecanismo de resuspensión.

Posteriormente se diseñó un escenario hipotético de accidente sobre la base del suceso denominado “Short-Term Station Blackout Unmitigated”, explicado por la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (Sandia National Laboratories, 2012). Además, se utilizó para el diseño un archivo meteorológico real y una distribución de población uniforme de 1 persona·km<sup>-2</sup>. El estudio se realizó en un área circular de radio 20.65 km alrededor de la central.

En primer término, se realizaron las simulaciones necesarias para demostrar que la instalación cumpla con la normativa argentina. La Norma AR 3.1.3 (ARN, 2002) establece que ningún individuo en las inmediaciones de una planta nuclear debe superar el límite de Riesgo Radiológico Individual (RRI) establecido de  $1 \times 10^{-07}$ .

Para analizar el impacto de las contramedidas no se utilizó el límite de *RRI* de  $1 \times 10^{-07}$  definido por la Norma AR 3.1.3 (ARN, 2002), dado que este se calcula para un tiempo de exposición de 24 h y no se considera la aplicación de contramedidas. En cambio, se redefinió el tiempo de exposición utilizado para el cálculo del *RRI* a una semana para así permitir la aplicación de medidas de mitigación que pudieran demorarse más de 24 h. Los valores de riesgo obtenidos no se contrastaron contra un límite particular, ya que el mismo no está establecido para este tiempo de exposición. En cambio, se optó por evaluar la variación respecto a un escenario donde no se aplican contramedidas en el corto plazo.

En el análisis de los costos de la aplicación de las medidas de mitigación, se diferenciaron las de la fase de emergencia (Ecuación 6) de las de largo plazo (Ecuación 7). Se estableció que las medidas consideradas en la fase de emergencia, evacuación y relocalización tenían un costo fijo por persona y por día, mientras que refugio y suministro de pastillas de KI no representaban costo alguno.

Se definieron nueve escenarios en los que se evaluó de manera gráfica y analítica la variación del riesgo en el área de estudio. Para la evaluación analítica se consideró la ubicación de *RRI*<sub>máx</sub> y el *RRI* relativo. El *RRI* relativo representa el *RRI* obtenido mediante la implementación de o una o más contramedidas respecto al obtenido sin aplicar ninguna contramedida.

El escenario donde no se aplicaron contramedidas en la fase de emergencia se denominó Caso 0. Los Casos 1 a 4 corresponden a la aplicación de las contramedidas de la fase emergencia independientemente una de otra, de a una por vez y en todo el dominio, mientras que en los Casos 5 a 8 las contramedidas se aplicaron de manera progresiva y en distintas áreas.

En el Caso 1 se refugió en sus hogares a toda la población presente en el área de estudio. Se consideró que esta actividad iniciaba 3 h después de la liberación. En el Caso 2 se consideró que toda la población en el área de estudio comienza a evacuarse a las 3 h desde la liberación. En el Caso 3 se relocalizó a la población dentro del área de estudio cuya dosis efectiva proyectada para una exposición de una semana superó 0.01 Sv. En el Caso 4 se distribuyeron pastillas de yoduro de potasio al 50% de la población y se consideró que esta medida tenía una eficacia del 70%.

Se observó que todas las contramedidas aplicadas generaron una disminución en el *RRI* de la población, pero en distinta magnitud. El menor *RRI* se obtuvo para la relocalización (Caso 3). A este escenario lo siguieron el de la evacuación (Caso 2), el refugio (Caso 1) y el suministro de pastillas de KI (Caso 4). El efecto más relevante generado por esta contramedida se observó en que la incidencia de cáncer de tiroides se redujo a casi dos tercios de la obtenida para el Caso 0.

Considerar la aplicación de contramedidas de manera individual permite comprender el efecto de cada una sobre el *RRI*. Sin embargo, no es fácil compararlas entre sí debido a que cada una implica distintos tiempos de exposición de los individuos. Por ejemplo, en los Casos 1 y 2 el refugio y la evacuación comienzan a las 3 h desde la liberación, pero el individuo refugiado permanece dentro de su casa hasta finalizar la semana, mientras que el evacuado, que sale del área de estudio, no recibe más dosis. Por lo tanto, el refugiado tiene un tiempo de exposición mayor.

Puestas de manifiesto los efectos generados por las contramedidas individuales, en los siguientes casos se aplicaron estas de manera progresivas.

En el Caso 5 se refugió en sus hogares a toda la población presente en un área de 10 km de radio alrededor de la central. El refugio comenzó pasadas 2.75 h desde la liberación. En el Caso 6 se contemplan las medidas de refugio y evacuación. Se refugió a la población presente en un área de 10 km de radio alrededor de la central (como en el Caso 5) y se adicionó que luego de 1 h de refugio la población comienza a evacuarse. El Caso 7 incluye las medidas de refugio, evacuación y relocalización. Las dos primeras se realizan del mismo modo que en el Caso 6. Los individuos fuera del área de 10 km de radio son relocalizados según un criterio de dosis. Aquellos cuya dosis efectiva proyectada para una exposición de una semana sea mayor o igual a 0.05 Sv, se relocalizarán luego de 24 h de la llegada de la pluma. Aquellos cuya dosis proyectada sea mayor o igual a 0.01 Sv, se relocalizarán luego de 36 h de la llegada de la pluma. El Caso 8 contempla las medidas de refugio, evacuación, relocalización y suministro de pastillas de KI. El refugio, la evacuación y la relocalización se realizaron del mismo modo que en el Caso 7. Se supuso que se le entregaban pastillas de yoduro de potasio al 50% de la población presente en el área de estudio y que estas tenían una eficacia del 70%.

Comparando los casos estudiados con la aplicación progresiva de contramedidas se observó que en los Casos 5 y 6 se obtuvieron efectos dentro del área de 10 km alrededor de la central, mientras que en los Casos 7 y 8 los efectos se dieron en toda el área de estudio. En general se observó que, al incrementarse la cantidad de medidas aplicadas, se obtuvieron mayores disminuciones en el RRI.

Resulta interesante evaluar la aplicación de más de una medida de mitigación por escenario, ya que esto permite administrar mejor los recursos, tanto económicos como humanos; y organizar las acciones en distintos momentos. De este modo, se pueden llevar a cabo primero las medidas que afecten a las personas cuyo RRI sea mayor, disminuyendo así los posibles efectos sobre las mismas.

El costo de las medidas de mitigación implementadas en el largo plazo fue el mismo para todos los Casos analizados. En el largo plazo se consideraron como contramedidas: el descarte de productos agrícolas, prohibición temporal de la agricultura, remediación, remediación seguida de interdicción y expropiación de propiedades. Los costos de las medidas de largo plazo se dieron en función del área afectada, la concentración de actividad, la actividad económica, el valor de la propiedad, entre otros. Que el costo para todos los escenarios haya permanecido invariable se debe a que dichas medidas no obedecen directamente de las dosis recibidas por la población, sino que dependen principalmente de las concentraciones ambientales de actividad, que no se ven afectadas por las contramedidas implementadas en la fase de emergencia.

En general se observó que las contramedidas Refugio (Caso 1), Suministro de KI (Caso 4) y Refugio dentro del área de 10 km (Caso 5) generan una disminución del  $RRI_{máx}$  sin representar ningún costo en la fase de emergencia, su Índice de reducción del RRI fue  $0 \text{ USD} \cdot (\text{unidad porcentual de } RRI_{máx} \text{ reducida})^{-1}$ . Esto se debe a que el refugio (para ambos Casos) y el suministro de KI no tienen costos asociados considerados en el código WinMACCS. Se advierte que es una falencia del software no considerar los costos de estas medidas de mitigación. Si bien está la posibilidad de que las personas refugiadas subsistan por un determinado tiempo con las reservas de alimentos que tienen en sus hogares, si la situación accidental se extendiera, las instituciones a cargo deberían suministrar víveres y asistencia de salud. Las pastillas de KI también deberían representar un costo, ya que deben ser producidas y mantenidas en buen estado y, además, deben ser suministradas a la población en el momento adecuado. Si bien estos Casos son de bajo costo es importante destacar que son los que evidenciaron las menores disminuciones del riesgo.

La contramedida más eficiente, fue la Relocalización de toda la población (Caso 3), ya que presentó la mayor disminución del  $RRI_{máx}$  y el menor índice de reducción del  $RRI$  equivalente a  $61 \text{ USD} \cdot (\text{unidad porcentual de } RRI_{máx} \text{ reducida})^{-1}$ . En el caso de la Evacuación (Caso 2) de toda la población, también se generaron importantes disminuciones en el  $RRI$ , pero el índice de reducción del  $RRI$  fue de  $966 \text{ USD} \cdot (\text{unidad porcentual de } RRI_{máx} \text{ reducida})^{-1}$ , ampliamente mayor que en el de Relocalización (Caso 3). A pesar de que mediante la aplicación de estas medias se redujo el  $RRI$  en todo el dominio, se reconoce que relocalizar (según el límite de dosis) o evacuar a toda la población presente en el radio de 20 km alrededor de la central son tareas muy complejas debido a la logística necesaria para llevarlas adelante.

El alto costo de la evacuación presentada en este trabajo se debe a que no se implementaron criterios para realizarla. En la evacuación masiva se incluye también a los individuos ubicados en la zona sur, cuyo riesgo es sumamente bajo, desconociendo prioridades. El costo podría optimizarse si se definiera un plan, en que, por ejemplo, se evacuara solamente el área ocupada por individuos afectados.

En caso donde se aplicó el Refugio seguido de evacuación (Caso 6), se obtuvo un  $RRI_{máx}$  correspondiente al 17% del valor del caso base (Caso 0), con un índice de reducción del  $RRI$  de  $237 \text{ USD} \cdot (\text{unidad porcentual de } RRI_{máx} \text{ reducida})^{-1}$ . A simple vista, esta puede parecer una buena opción, porque es menor la población que se desplaza y mayor el efecto, pero cabe destacar que en la misma no se logra ningún cambio en el  $RRI$  fuera de los 10 km.

Los casos de refugio, evacuación y relocalización (Casos 7) y refugio, evacuación, relocalización y suministro de KI (Casos 8) arrojaron resultados similares en cuanto a la disminución del  $RRI$  y los índices de reducción del  $RRI$ . El Índice de reducción del  $RRI$  para el Caso 7 fue  $247 \text{ USD} \cdot (\text{unidad porcentual de } RRI_{máx} \text{ reducida})^{-1}$  y para el Caso 8 fue  $237 \text{ USD} \cdot (\text{unidad porcentual de } RRI_{máx} \text{ reducida})^{-1}$ . Además, generaron cambios en el  $RRI$  que abarcan toda el área de estudio. Es esperable que en el Caso 8 se haya producido una reducción en la incidencia de cáncer de tiroides, como se observó en el Caso 4.

El Caso 8, al incorporar el suministro de pastillas de KI, permite que una menor fracción de la población en riesgo deba ser relocalizada. Se señala que el número de individuos a relocalizar es menor en comparación con el Caso 7. Esto se debe a que aquellos quienes, habiendo recibido el yoduro de potasio, presenten una dosis efectiva menor al límite establecido, no serán reubicados. El movilizar a menos personas quita complejidad al proceso de relocalización al momento de ocurrir el accidente, incurriéndose en menores costos asociados.

Es importante mencionar que este trabajo fue realizado en el contexto de un proyecto de investigación financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica, bajo contrato número 22594.

## 9 Trabajos Futuros

Durante el desarrollo del presente TFI surgieron cuestiones que no se pudieron abordar debido al tiempo disponible y alcance de los objetivos establecidos, pero que se listan a continuación con la idea de ser incluidos en trabajos futuros:

- ✓ Analizar el impacto en el *RRI* considerando diferentes costumbres alimenticias.
- ✓ Analizar diferentes estrategias de evacuación y qué efecto pueden tener en el *RRI* y los costos de su implementación.
- ✓ Explorar las posibilidades de incorporar Sistemas de Información Geográfica a los estudios de *RRI* y desarrollo de estrategias de contramedidas ante accidentes nucleares o radiológicos.
- ✓ En base a los resultados obtenidos, identificar la contramedida o combinación de contramedidas que minimice el *RRI* y los costos económicos dependiendo de las características del accidente nuclear o radiológico.
- ✓ Trabajar sobre los datos de entrada del módulo CHRONC con el objetivo de que sean más representativos para las instalaciones nucleares de Argentina y obtener resultados más precisos de los impactos a largo plazo de un accidente nuclear o radiológico.
- ✓ Desarrollar un análisis de incertezas considerando variaciones en los parámetros característicos de los módulos EARLY y CHRONC, por ejemplo, los tiempos de demora en la implementación de las contramedidas.

## 10 Bibliografía

- Ahrens, C. and Henson, R. (2016). *Meteorology Today* (11 Ed). Canadá: Cengage Learning.
- ARN. (2001). Norma AR 10.1.1. Norma básica de seguridad radiológica. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 22/01 (Boletín Oficial 20/11/01). Modificada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N°230/16 (Boletín Oficial 29/04/16). Argentina.
- ARN. (2002). Norma AR 3.1.3. Criterios radiológicos relativos a accidentes en reactores nucleares de potencia. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 41/01 (Boletín Oficial N° 29.834, 08/02/02). Argentina.
- ARN. (s.f.). Acerca de ARN. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de <https://www.argentina.gob.ar/arn/institucional/acerca-de-arn>
- Caputo M. (2012). Desarrollo de un modelo analítico de dispersión sedimentación y deposición atmosférica de contaminantes para evaluaciones de seguridad nuclear (Tesis Doctoral). Instituto Balseiro, Argentina.
- Chanin, D. I.; Sprung, J. L.; Ritchie, L. T. y Jow, H-N. (1990). MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS), Volume I, User's Guide. NUREG/CR-4691, SAND86-1562. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.
- CNEA. (2018a). Protección Radiológica. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de [https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2018/08/04\\_Proteccion\\_Radiolo%C3%B3gica\\_08.08.18.pdf](https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2018/08/04_Proteccion_Radiolo%C3%B3gica_08.08.18.pdf)
- CNEA. (2018b). Radiación. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de [https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2018/08/09\\_Radiaci%C3%B3n\\_08.08.18.pdf](https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2018/08/09_Radiaci%C3%B3n_08.08.18.pdf)
- CNEA. (2017). Centrales y Reactores Nucleares. Recuperado el 29 de octubre de 2019 de <https://www.cnea.gob.ar/campus/course/view.php?id=10>
- Colls, J. (2002). *Air pollution* (2da. Ed.). Londres, Inglaterra: Spon Press.
- Consejo de Seguridad Nuclear de España (2015). La energía nuclear. Recuperado el 25 de octubre de 2019 de <https://www.csn.es/la-energia-nuclear>
- Giménez, M. y Caputo, M. (2020) Metodología para la Evaluación del Riesgo Radiológico en el Público para verificación de las Normas AR 3.1.3 y AR 4.1.3, ITE-EN\_GIN-SN-013
- Henry, J. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería ambiental* (2da. Ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- IAEA. (s.f.). Country Details, Argentina. Power Reactor Information System. Recuperado el 03 de noviembre de 2019 de <https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=AR>
- IAEA. (1986). Atmospheric Dispersion Models for application in relation to radionuclide releases. IAEA-TECDOC-379. Viena, Austria: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (s.f.). El OIEA. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de <https://www.iaea.org/es/el-oiea>

IAEA. (s.f.). Seguridad de las instalaciones nucleares. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de <https://www.iaea.org/es/temas/seguridad-de-las-instalaciones-nucleares>

ICRP. (2007). Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. Madrid, España.

ICRP. (2019a). Effects of Exposure. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de [http://icrpaedia.org/Effects\\_of\\_Exposure](http://icrpaedia.org/Effects_of_Exposure)

ICRP. (2019b). Guide to the Basics of Ionising Radiation. Recuperado el 08 de octubre de 2019 de [http://icrpaedia.org/ICRP%C3%A6dia\\_Guide\\_to\\_the\\_Basics\\_of\\_Ionising\\_Radiation](http://icrpaedia.org/ICRP%C3%A6dia_Guide_to_the_Basics_of_Ionising_Radiation)

Jow, H-N; Sprung, J. L.; Rollstin, J. A.; Ritchie, L. T. y Chanin, D. I. (1990). MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS), Volume II, Model Description. NUREG/CR-4691, SAND86-1562. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.

Organización Panamericana de la Salud. (enero, 2005). Curso de auto instrucción. Conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire. Recuperado el 12 de octubre de 2019 de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/prologo.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/prologo.html)

Pal Arya S. (1999). Air Pollution, Meteorology and Dispersion. Nueva York, Estados Unidos: Oxford University Press.

Palmero, C.; López, M.; Zelaya, S.; Díaz, L.; Morresi, L.; Muñoa, E.; Cohen, J. y Cohen, M. (2016). Incidencia de cáncer de tiroides en la provincia de Río Negro. Recuperado el 28 de enero de 2020 de <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-argentina-endocrinologia-metabolismo-185-articulo-incidencia-cancer-tiroides-provincia-rio-S0326461016300080>

Sandia National Laboratories (2012). State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project, Volume 2: Surry Integrated Analysis. NUREG/CR-7110. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.

Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change (2da. Ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley y Sons.

Sprung, J. L.; Rollstin, J. A.; Helton, J. C. y H-N Jow (1990). Evaluation of Sever e Accident Risks: Quantification of Major Input Parameters. NUREG/CR-4551. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.

Till, J. y Grogan, H. (2008). Radiological risk assessment and environmental analysis. Nueva York, Estados Unidos: Oxford University Press.

Tipler, P. y Llewellyn, R. (2012). Modern physics (6ta. Ed.). Nueva York, Estados Unidos: W.H. Freeman and Company.

Young, M. (1995) A review of the MELCOR Accident Consequence Code. International Nuclear Information System (Volumen 26, tema 12). Recuperado el 06 de mayo de 2019 de [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:26045680](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:26045680)

Zannetti P. (1990). Air Pollution Modeling. Theories, Computational Methods and Available Software. Nueva York, Estados Unidos: Springer Science+Business Media.

## 11 Anexo 1

Código desarrollado para calcular y graficar el RRI.

```
#Importamos las bibliotecas que vamos a usar
import struct
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.colors

#Escenario
#titulo='Sin contramedidas'
titulo2='sin_contramedidas'

#Funciones para leer el archivo Model1AllDose de WinMaccs
def read_int(idx):
    i = struct.unpack('i',data[idx:idx+4])[0]
    return i

def read_block_idx_v(data):
    block_idx_v =[]
    idx = 0

    while idx < len(data) - 4:
        n_read = read_int(idx)
        idx += 4

        block_idx_v.append( (idx, idx+n_read) )
        idx += n_read

        assert n_read == read_int(idx), "ERROR no se pudo validar la lectura
0x{:08x}".format(idx-4)
        idx += 4

    return block_idx_v

def read_block(data, block_idx):
    fmt='f'
    length = (block_idx[1] - block_idx[0]) // 4
    block_data = struct.unpack('{}{}'.format(length, fmt), data[block_idx[0]:block_idx[1]])
    return np.array(block_data, dtype=np.float32)

def F_Do_Resp(dosis):
    if dosis < 0.000002:
        return 0.000001
    elif dosis < 1 :
        return 0.05 * dosis
    elif dosis < 6:
        return 0.05 * (dosis**1.67195)
    else:
        return 1

def dose_from_resp(resp):
    if resp <0.000001:
        return 0.000002
    elif resp <= 0.05:
        return resp / 0.05
    elif resp < 1.0:
        return (resp / 0.05)**0.598104
    else:
        return 6.0

if __name__ == '__main__':

    print('Empiezo a cargar el archivo \n',)

    file_name = 'Model1AllDose.bin'
    with open(file_name, 'br') as f:
        data = f.read()
    f.close()
    print('Versión de MACCS: ', struct.unpack('10s',data[4:4+10]))
    print('Fecha de la simulación: ', struct.unpack('8s',data[22:(22+8)]))
```

```

print('Hora de la simulación: ', struct.unpack('10s',data[38:38+10]))
print('Directorio: ', struct.unpack('500s',data[56:56+500]))
print('Skip EARLY Run: ',struct.unpack('?',data[558:559]))
print('Skip CHRONC Run: ',struct.unpack('?',data[560:561]))
print('Cantidad de términos fuentes ', struct.unpack('l',data[580:580+4]))

print('Cantidad de trials N_Trials ',struct.unpack('l',data[584:584+4]))
N_TRIALS=struct.unpack('i',data[584:588])[0]

print('Number of Evacuation Strategies',struct.unpack('l',data[588:588+4]))

print('Nro de subángulos N_FIN',struct.unpack('l',data[592:592+4]))
N_FIN=struct.unpack('i',data[592:596])[0]

print('Nro de radios N_RAD',struct.unpack('l',data[596:596+4]))
N_RAD=struct.unpack('i',data[596:600])[0]

print('Nro de sectores N_COR',struct.unpack('l',data[600:600+4]))
N_COR=struct.unpack('i',data[600:604])[0]

print('NO SE ',struct.unpack('i',data[604:608]))
NOSE=struct.unpack('i',data[604:608])[0]

print('NO SE2 ',struct.unpack('i',data[608:608+4]))
NOSE2=struct.unpack('i',data[608:612])[0]

print('Título ',struct.unpack('80s',data[612:612+80]) , '\n')
print('Título ',struct.unpack('80s',data[700:700+80]) , '\n')
print('Empiezo a cargar las listas \n',)

block_idx_v = read_block_idx_v(data)

dd_v = []

for i, (i_s, i_e) in enumerate(block_idx_v):
    if (i_e - i_s)//4 == N_COR*N_RAD*N_FIN:
        lb = read_block(data, [i_s, i_e])
        dd = lb.reshape((N_COR,N_RAD,N_FIN))
        dd_v.append(dd)

mat_dosis = np.array(dd_v) #contiene todas las dosis, forma [N_TRIALS,N_COR,N_RAD,N_FIN]

dist=np.array([0.05,0.375,0.8,1.1,1.4,1.7,2,2.3,2.6,2.9,3.2,3.5,4,4.5,5,5.5,6,6.5,7,8,9,10,11,12
,13,14,15,16,17,18,19,20,21]) #radios de la grilla
zo_ex=2 #radio donde termina la zona de exclusion
Ang=np.linspace(0,360,N_COR+1)

#Vectores para estadística
dosis_vector = np.array([])
dosis_vector_sin_0 = np.array([])
dosis_vector_may_lim = np.array([])

mat_f_d_r = np.array([])
mat_f_d_r= np.vectorize(F_Do_Resp)(mat_dosis) #aplica la función dosis-respuesta a la
matriz

dosis_vector = np.resize(mat_dosis,N_COR * N_RAD * N_FIN * N_TRIALS)
dosis_vector_sin_0 = dosis_vector[dosis_vector>0]
dosis_vector_may_lim = dosis_vector[dosis_vector>2.0e-4]

dosis_vector_sin_zo_ex = np.resize(mat_dosis[:,:,zo_ex:],N_COR * (N_RAD-2) * N_FIN *
N_TRIALS)
dosis_vector_sin_zo_ex_sin_0 = dosis_vector_sin_zo_ex[dosis_vector_sin_zo_ex>0]

corrido=int(N_FIN/2) #los ángulos de interés están en el medio del segmento espacial
pi=3.14159265359
subang=np.zeros(N_COR*N_FIN+1)
for i in range(len(subang)):
    subang[i]=round(360/(N_COR*N_FIN)*i,12) #vector con todos los ángulos y subángulos
matriz_riesgo=np.zeros((len(dist),len(subang)))

P_T_F = 2.e-6 #probabilidad del término fuente

```

```

print('Empiezo a calcular el riesgo \n',)
Dosis_Equiv_Riesgo = np.array([])
Dosis_Equiv_Riesgo.resize(N_COR, N_RAD,N_FIN)

Riesgo_n_j = np.array([])
Riesgo_n_j.resize(N_COR, N_RAD,N_FIN)
Fata_n_j = np.array([])
Fata_n_j.resize(N_COR, N_RAD,N_FIN)

riesgo_vector = np.array([])
riesgo_vector_sin_0 = np.array([])

Dosis_Equiv_Riesgo_vector = np.array([])

angulo_1 = np.array([])
angulo_1.resize(N_COR * N_FIN)

#Cálculo del riesgo
for j in range(len(mat_dosis[0])): #cuenta los ángulos
    for k in range(zo_ex,len(mat_dosis[0][j])): #cuenta los radios desde la zona de
exclusión
        for l in range(len(mat_dosis[0][j][k])): #cuenta los subángulos

            TR = mat_dosis[:,j,k,l]
            TR_F = mat_f_d_r[:,j,k,l] #en esta matriz no aparecen más valores negativos o
ceros ya que está corregida la función respuesta

            f_d_r_suma = TR_F.sum()
            nro_dos_dis_cer = len(TR.nonzero()[0]) # compara con 2.0e-4
            Dosis_Equiv_Riesgo[j,k,l] = dose_from_resp(f_d_r_suma/nro_dos_dis_cer)
            Riesgo_n_j[j,k,l] =P_T_F * (nro_dos_dis_cer/N_TRIALS) *
(f_d_r_suma/nro_dos_dis_cer)

            nro_dos_may_lim = len(TR[TR>2.0e-4])
            if nro_dos_may_lim != 0 :
                Dosis_Equiv_Riesgo[j,k,l] = dose_from_resp(f_d_r_suma/nro_dos_may_lim)
                Riesgo_n_j[j,k,l] =P_T_F * (nro_dos_may_lim/N_TRIALS) *
F_Do_Resp(Dosis_Equiv_Riesgo[j,k,l])
            else:
                nro_dos_dis_cer = len(TR[TR>0.])
                Dosis_Equiv_Riesgo[j,k,l] = TR.max()
                Riesgo_n_j[j,k,l] =P_T_F * (nro_dos_dis_cer/N_TRIALS) *
F_Do_Resp(Dosis_Equiv_Riesgo[j,k,l])

            #Variables que van a estar en el archivo de salida
            distancia = dist[k]
            angulo = round(Ang[j]+360/(N_COR*N_FIN)*(1-corrido),12)
            if angulo<0:
                angulo=angulo+360
            angulo_1[N_FIN*j+1] = angulo #Esto está cargado para graficar una
superficie en Python
            riesgo = Riesgo_n_j[j,k,l]
            dosis = Dosis_Equiv_Riesgo[j,k,l]
            fatalidad = F_Do_Resp(dosis)
            Fata_n_j[j,k,l] = fatalidad

            #Crear la matriz del gráfico de contornos - Riesgo
            for q in range(len(dist)):
                for w in range(len(subang)):
                    if distancia==dist[q]:
                        if angulo == subang[w]:
                            matriz_riesgo[q][w]=Riesgo_n_j[j,k,l]
                        if angulo==0:
                            matriz_riesgo[q][len(subang)-1]=Riesgo_n_j[j,k,l]

Dosis_Equiv_Riesgo_vector=np.resize(Dosis_Equiv_Riesgo,N_COR * N_RAD * N_FIN)
riesgo_vector=np.resize(Riesgo_n_j, N_COR * N_RAD * N_FIN)
riesgo_vector_sin_0=riesgo_vector[riesgo_vector>0]
Riesgo_max = Riesgo_n_j[:,zo_ex,:].max()

```

```

#Buscar los puntos de interés en matriz_riesgo
vector_riesgo=np.resize(matriz_riesgo,N_COR*N_RAD*N_FIN)
vector_riesgo.sort()
for i in range(len(vector_riesgo)):
    if vector_riesgo[i]==matriz_riesgo.max():
        qmax=(round(i/len(vector_riesgo)*100))
    if vector_riesgo[i]==matriz_riesgo[2,296]:
        qp1=(round(i/len(vector_riesgo)*100))
    if vector_riesgo[i]==matriz_riesgo[22,296]:
        qp2=(round(i/len(vector_riesgo)*100))

a1=np.unravel_index(matriz_riesgo.argmax(),matriz_riesgo.shape)[0]
a2=np.unravel_index(matriz_riesgo.argmax(),matriz_riesgo.shape)[1]
print('Punto', 'riesgo', 'cuantil', 'distancia', 'ángulo ')
print('Máximo_riesgo:',matriz_riesgo.max(),qmax,dist[a1],subang[a2]) #máximo riesgo
print('Punto_1:', matriz_riesgo[2,296],qp1, dist[2], subang[296])
print('Punto_2:', matriz_riesgo[22,296],qp2,dist[22], subang[296])

# Formato de los globos de texto de los gráficos
bbox = dict(boxstyle="round", fc="0.9",edgecolor='black')
arrowprops = dict(arrowstyle = "->",connectionstyle = "arc3,rad=-0.3")

mat_dosis_mean = np.mean(mat_dosis,0)
mat_dosis_max = np.max(mat_dosis,0)

#Matrices para graficar dosis media y dosis máxima
matriz_mean=np.zeros((len(dist),len(subang)))
matriz_max=np.zeros((len(dist),len(subang)))

for j in range(len(mat_dosis[0])): #cuenta los angulos
    for k in range(zo_ex,len(mat_dosis[0][j])): #cuenta los radios
        for l in range(len(mat_dosis[0][j][k])): #cuenta los subangulos

            distancia = dist[k]
            angulo = round(Ang[j]+360/(N_COR*N_RAD)*(1-corrido),12)
            if angulo<0:
                angulo=angulo+360

#Dosis Media
    for q in range(len(dist)):
        for w in range(len(subang)):
            if distancia==dist[q]:
                if angulo == subang[w]:
                    matriz_mean[q][w]=mat_dosis_mean[j,k,l]
                if angulo==0:
                    matriz_mean[q][len(subang)-1]=mat_dosis_mean[j,k,l]

#Dosis Máxima
    for q in range(len(dist)):
        for w in range(len(subang)):
            if distancia==dist[q]:
                if angulo == subang[w]:
                    matriz_max[q][w]=mat_dosis_max[j,k,l]
                if angulo==0:
                    matriz_max[q][len(subang)-1]=mat_dosis_max[j,k,l]

#Buscar los puntos de interés en las matrices de dosis máxima y media
vector_dmax=np.resize(matriz_max,N_COR*N_RAD*N_FIN)
vector_dmax.sort()
vector_dmean=np.resize(matriz_mean,N_COR*N_RAD*N_FIN)
vector_dmean.sort()
for i in range(len(vector_dmax)):
    if vector_dmax[i]==matriz_max.max():
        qdmax=(round(i/len(vector_dmax)*100))
    if vector_dmean[i]==matriz_mean.max():
        qdmean=(round(i/len(vector_dmean)*100))
    if vector_dmax[i]==matriz_max[2,296]:
        qdmaxp1=(round(i/len(vector_dmax)*100))
    if vector_dmean[i]==matriz_mean[2,296]:
        qdmeanp1=(round(i/len(vector_dmean)*100))
    if vector_dmax[i]==matriz_max[22,296]:

```

```

        qdmaxp2=(round(i/len(vector_dmax)*100))
    if vector_dmean[i]==matriz_mean[22,296]:
        qdmeanp2=(round(i/len(vector_dmean)*100))

#Dosis máxima
b1=np.unravel_index(matriz_max.argmax(),matriz_max.shape)[0]
b2=np.unravel_index(matriz_max.argmax(),matriz_max.shape)[1]
print('Punto', 'dosis','cantil','distancia','ángulo ')
print('Máxima_dosis:',matriz_max.max() ,qdmax,dist[b1],subang[b2]) #máxima dosis
print('Punto_1:', matriz_max[2,296], qdmaxp1,dist[2], subang[296])
print('Punto_2:', matriz_max[22,296], qdmaxp2,dist[22], subang[296])
#Dosis media
c1=np.unravel_index(matriz_mean.argmax(),matriz_mean.shape)[0]
c2=np.unravel_index(matriz_mean.argmax(),matriz_mean.shape)[1]
print('Máxima_dosis_media:',matriz_mean.max() ,qdmean,dist[c1],subang[c2]) #máxima dosis
media
print('Punto_1:', matriz_mean[2,296], qdmeanp1,dist[2], subang[296])
print('Punto_2:', matriz_mean[22,296], qdmeanp2, dist[22], subang[296])

#Graficación

#GRAFICO DEL RIESGO EN COORDENADAS POLARES
Radios = np.array(dist) # Distancias desde la fuente
Angulos = np.radians(subang) # Sectores
r, theta = np.meshgrid(Angulos,Radios) # Armado de la grilla
Z = matriz_riesgo
# Figura
fig, ax = plt.subplots(subplot_kw = dict(projection='polar'))
# Contornos
levels = [0,1E-10,1E-9,1E-8,1E-7,1.456E-7]
ax.contour( r, theta, Z, levels, colors='k', linewidths=.5, linestyle=None)
# Colores
norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(levels,len(levels)) # Normaliza los colores
import matplotlib.colors
cmap = matplotlib.colors.ListedColormap(['white','LightBlue','SpringGreen', 'yellow',
'red']) #selecciono los colores
norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(levels, cmap.N, clip=True)
CS = ax.contourf(r, theta, Z, levels, cmap = cmap,norm=norm)
# Ejes
ax.set_theta_direction(-1) # Sentido horario
ax.set_theta_zero_location("N") # El 0 se ubica en el norte
ax.set_thetagrids(np.arange(0, 360,
22.5),['N','NNE','NE','ENE','E','ESE','SE','SSE','S','SSO','SO','OSO','O','ONO','NO','NNO'])
rmax = 20 # El gráfico se extiende hasta 20000 metros
ax.set_rmax(rmax)
ax.set_rticks([0,3,5,10,15,20])
ax.set_rlabel_position(-22.5)
ax.grid(True)
# ax.set_title(titulo, va='bottom')
# Colorbar
cbar = plt.colorbar(CS, boundaries=levels, spacing="uniform")
cbar.ax.set_title('Riesgo')
cbar.set_ticklabels(levels)
# Riesgo máximo
rmax=str(matriz_riesgo.max())
rmax2=rmax[0:5]+rmax[17:]
ax.annotate(rmax2,
            xy=(Angulos[a2],Radios[a1]), # theta, radius
            xytext=(0.3, 0.3), # ubicación en la figura (fraction, fraction)
            textcoords='figure fraction',
            horizontalalignment='left',
            verticalalignment='bottom',
            arrowprops=arrowprops,
            bbox = bbox)
# Guarda Figura
plt.savefig('Riesgo_'+titulo2+'_.png',dpi=1200)
plt.show()

#GRAFICO DE LA DOSIS MAXIMA EN COORDENADAS POLARES
Radios = np.array(dist) # Distancias desde la fuente
Angulos = np.radians(subang) # Sectores
r, theta = np.meshgrid(Angulos,Radios) # Armado de la grilla

```

```

Z = matriz_max

# Figura
fig, ax = plt.subplots(subplot_kw = dict(projection='polar'))
# Contornos
levels=[0,.001,.01,.1,1,6,15,17]
ax.contour( r, theta, Z, levels, colors='k', linewidths=.5, linestyle=None)
# Colores
norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(levels,len(levels)) # Normaliza los colores
import matplotlib.colors
cmap = matplotlib.colors.ListedColormap(['white','LightBlue','SpringGreen', 'yellow',
'orange','red']) #selecciono los colores
norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(levels, cmap.N, clip=True)
CS = ax.contourf(r, theta, Z, levels, cmap = cmap,norm=norm)
# Ejes
ax.set_theta_direction(-1) # Sentido horario
ax.set_theta_zero_location("N") # El 0 se ubica en el norte
ax.set_theta_ticks(np.arange(0, 360,
22.5),['N','NNE','NE','ENE','E','ESE','SE','SSE','S','SSO','SO','OSO','O','ONO','NO','NNO'])
rmax = 20 # El gráfico se extiende hasta 2000 metros
ax.set_rmax(rmax)
ax.set_rticks([0,3,5,10,15,20])
ax.set_rlabel_position(-22.5)
ax.grid(True)
# ax.set_title(titulo, va='bottom')
# Colorbar
cbar = plt.colorbar(CS, boundaries=levels, spacing="uniform")
cbar.ax.set_title('Dosis máxima [Sv]')
cbar.set_ticklabels(levels)
# Guarda Figura
plt.savefig('Dosis_max_'+titulo2+'_.png',dpi=1200)

plt.show()

#GRAFICO DE LA DOSIS MEDIA EN COORDENADAS POLARES
Radios = np.array(dist) # Distancias desde la fuente
Angulos = np.radians(subang) # Sectores
r, theta = np.meshgrid(Angulos,Radios) # Armado de la grilla
Z = matriz_mean

# Figura
fig, ax = plt.subplots(subplot_kw = dict(projection='polar'))
#Contornos
levels=np.linspace(0,8.78E-1,7)
ax.contour( r, theta, Z, levels, colors='k', linewidths=.5, linestyle=None)
# Colores
norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(levels,len(levels)) # Normaliza los colores
import matplotlib.colors
cmap = matplotlib.colors.ListedColormap(['white','LightBlue','SpringGreen', 'yellow',
'orange','red']) #selecciono los colores
norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(levels, cmap.N, clip=True)
CS = ax.contourf(r, theta, Z, levels, cmap = cmap,norm=norm)
# Ejes
ax.set_theta_direction(-1) # Sentido horario
ax.set_theta_zero_location("N") # El 0 se ubica en el norte
ax.set_theta_ticks(np.arange(0, 360,
22.5),['N','NNE','NE','ENE','E','ESE','SE','SSE','S','SSO','SO','OSO','O','ONO','NO','NNO'])
rmax = 20 # El gráfico se extiende hasta 3000 metros
ax.set_rmax(rmax)
ax.set_rticks([0,3,5,10,15,20])
ax.set_rlabel_position(-22.5)
ax.grid(True)
# ax.set_title(titulo, va='bottom')
# Colorbar
cbar = plt.colorbar(CS, boundaries=levels, spacing="uniform")
cbar.ax.set_title('Dosis media [Sv]')
cbar.set_ticklabels(levels)
# Guarda Figura
plt.savefig('Dosis_med_'+titulo2+'_.png',dpi=1200)

plt.show()

```

## 12 Anexo 2

Tabla A2-1

*Inventario del núcleo clasificado por clase de radionucleido.*

<b>Nombre de la clase de radionucleidos</b>	<b>Elemento representativo</b>	<b>Elementos miembros</b>	<b>Masa total (kg)</b>
Gases nobles	Xe	He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, H, N	448.2
Metales alcalinos	Cs	Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Cu	251.7
Metales alcalinotérreos	Ba	Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Es, Fm	187.6
Halógenos	I	F, Cl, Br, I, At	17.0
Anfígenos	Te	O, S, Se, Te, Po	40.9
Platinoides	Ru	Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au, Ni	309.5
Elementos de transición	Mo	V, Cr, Fe, Co, Mn, Nb, Mo, Tc, Ta, W	323.5
Tetraivalentes	Ce	Ti, Zr, Hf, Ce, Th, Pa, Np, Pu, C	1226.0
Trivalentes	La	Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Am, Cm, Bk, Cf	621.2
Uranio	U	U	66770.0
Grupo más volátil	Cd	Cd, Hg, Zn, As, Sb, Pb, Tl, Bi	7.26
Grupo menos volátil	Sn	Ga, Ge, In, Sn, Ag	9.19

Fuente: Sandia National Laboratories (2012).

Tabla A2-2

*Inventario del núcleo para cada radionucleido.*

<b>Radionucleido</b>	<b>Actividad (Bq)</b>	<b>Radionucleido</b>	<b>Actividad (Bq)</b>
Am-241	3.43E+14	Pu-238	8.31E+15
Ba-137m	2.92E+17	Pu-239	9.56E+14
Ba-139	5.54E+18	Pu-240	1.17E+15
Ba-140	5.37E+18	Pu-241	3.39E+17
Ce-141	4.87E+18	Rb-86	5.36E+15
Ce-143	4.55E+18	Rb-88	2.16E+18
Ce-144	3.42E+18	Rh-103m	4.61E+18
Cm-242	1.14E+17	Rh-105	2.90E+18
Cm-244	1.13E+16	Rh-106	1.56E+18
Co-58	4.79E+13	Ru-103	4.61E+18
Co-60	2.65E+14	Ru-105	3.14E+18
Cs-134	4.32E+17	Ru-106	1.40E+18
Cs-136	1.57E+17	Sr-89	2.98E+18
Cs-137	3.05E+17	Sr-90	2.27E+17
I-131	2.78E+18	Sr-91	3.75E+18
I-132	4.08E+18	Sr-92	4.00E+18
I-133	5.76E+18	Tc-99m	5.03E+18
I-134	6.48E+18	Te-127	2.60E+17
I-135	5.49E+18	Te-127m	4.22E+16
Kr-85	2.94E+16	Te-129	7.79E+17
Kr-85m	8.07E+17	Te-129m	1.49E+17
Kr-87	1.60E+18	Te-131	2.55E+18
Kr-88	2.14E+18	Te-131m	5.71E+17
La-140	5.67E+18	Te-132	4.29E+18
La-141	5.10E+18	Xe-133	6.07E+18
La-142	4.92E+18	Xe-135	1.80E+18
Mo-99	5.68E+18	Xe-135m	1.29E+18
Nb-95	5.18E+18	Y-90	2.39E+17
Nb-97	5.24E+18	Y-91	3.93E+18
Nb-97m	4.95E+18	Y-91m	2.20E+18
Nd-147	2.04E+18	Y-92	4.11E+18
Np-239	5.67E+19	Y-93	4.62E+18
Pr-143	4.65E+18	Zr-95	4.96E+18
Pr-144	3.63E+18	Zr-97	5.00E+18
Pr-144m	5.06E+16		

Fuente: Sandia National Laboratories (2012).

Tabla A2-3.

*Características de los segmentos de pluma liberados.*

<b>Segmento de pluma</b>	<b>PDELAY (s)</b>	<b>PLDUR (s)</b>	<b>PLMFLA (kg·s<sup>-1</sup>)</b>	<b>PLMDEN (kg·m<sup>3</sup>)</b>
1	0	3720	0.484	0.197
2	3700	3480	0.481	0.503
3	7200	3720	0.478	0.944
4	11100	3480	0.476	1.350
5	14100	3600	0.473	1.640
6	18100	3600	0.471	1.810
7	22100	3720	0.468	1.900
8	25100	3600	0.466	1.950
9	29100	3600	0.464	1.970
10	32100	3600	0.462	2.000
11	36100	3480	0.460	2.010
12	40100	3600	0.458	2.010
13	43100	3720	0.456	2.010
14	47100	3480	0.454	2.010
15	50100	3600	0.453	2.010
16	54100	3720	0.451	2.010
17	58100	3600	0.449	2.020
18	61100	3480	0.448	2.020
19	65100	3600	0.444	2.010
20	68100	3600	0.438	1.960
21	72100	3720	0.435	1.900
22	76100	3480	0.432	1.840
23	79100	1680	0.430	1.800
24	81100	120	0.430	1.780

Fuente: Sandia National Laboratories (2012).

Nota: Para cada segmento de pluma PDELAY representa los tiempos de liberación, PLDUR la duración de la liberación, PLMFLA el flujo másico de la pluma y PLMDEN la densidad.

Tabla A2-4.

*Fracción del inventario de cada clase de radionucleido liberada en cada segmento de pluma.*

Segmento de pluma	Xe	Cs	Ba	I	Te	Ru	Mo	Ce	La
1	3.86E-03	6.41E-06	1.13E-06	5.54E-05	8.81E-05	1.60E-07	6.91E-07	2.84E-07	1.18E-08
2	8.94E-03	1.38E-05	2.41E-06	1.24E-04	1.85E-04	3.30E-07	1.41E-06	5.85E-07	2.51E-08
3	1.74E-02	2.53E-05	4.36E-06	2.35E-04	3.28E-04	5.74E-07	2.42E-06	1.02E-06	4.52E-08
4	2.26E-02	3.11E-05	5.28E-06	3.00E-04	3.88E-04	6.68E-07	2.79E-06	1.19E-06	5.43E-08
5	2.77E-02	3.66E-05	6.12E-06	3.64E-04	4.39E-04	7.39E-07	3.05E-06	1.32E-06	6.21E-08
6	2.96E-02	3.78E-05	6.20E-06	3.89E-04	4.33E-04	7.14E-07	2.91E-06	1.28E-06	6.21E-08
7	3.10E-02	3.83E-05	6.20E-06	4.05E-04	4.21E-04	6.79E-07	2.73E-06	1.21E-06	6.13E-08
8	2.98E-02	3.50E-05	5.70E-06	3.78E-04	3.77E-04	5.92E-07	2.35E-06	1.06E-06	5.56E-08
9	2.93E-02	3.30E-05	5.41E-06	3.64E-04	3.47E-04	5.31E-07	2.08E-06	9.54E-07	5.19E-08
10	2.86E-02	3.12E-05	5.14E-06	3.51E-04	3.20E-04	4.76E-07	1.83E-06	8.58E-07	4.85E-08
11	2.69E-02	2.85E-05	4.72E-06	3.27E-04	2.84E-04	4.12E-07	1.55E-06	7.44E-07	4.38E-08
12	2.70E-02	2.79E-05	4.64E-06	3.27E-04	2.71E-04	3.81E-07	1.40E-06	6.90E-07	4.23E-08
13	2.70E-02	2.74E-05	4.52E-06	3.27E-04	2.58E-04	3.52E-07	1.27E-06	6.38E-07	4.09E-08
14	2.44E-02	2.45E-05	4.01E-06	2.97E-04	2.23E-04	2.95E-07	1.04E-06	5.36E-07	3.59E-08
15	2.44E-02	2.43E-05	3.95E-06	2.99E-04	2.14E-04	2.74E-07	9.45E-07	5.00E-07	3.50E-08
16	2.44E-02	2.42E-05	3.90E-06	3.02E-04	2.06E-04	2.54E-07	8.57E-07	4.65E-07	3.41E-08
17	2.28E-02	2.26E-05	3.62E-06	2.86E-04	1.86E-04	2.21E-07	7.32E-07	4.07E-07	3.13E-08
18	2.13E-02	2.07E-05	3.29E-06	2.64E-04	1.69E-04	1.93E-07	6.25E-07	3.56E-07	2.87E-08
19	2.14E-02	1.99E-05	3.12E-06	2.55E-04	1.65E-04	1.82E-07	5.78E-07	3.37E-07	2.84E-08
20	2.08E-02	1.84E-05	2.81E-06	2.37E-04	1.56E-04	1.65E-07	5.15E-07	3.07E-07	2.72E-08
21	2.07E-02	1.74E-05	2.60E-06	2.25E-04	1.52E-04	1.53E-07	4.70E-07	2.87E-07	2.67E-08
22	1.87E-02	1.50E-05	2.24E-06	1.95E-04	1.33E-04	1.29E-07	3.90E-07	2.43E-07	2.38E-08
23	8.79E-03	6.81E-06	1.06E-06	8.87E-05	6.16E-05	5.77E-08	1.73E-07	1.09E-07	1.11E-08
24	6.22E-04	4.76E-07	7.62E-08	6.21E-06	4.33E-06	4.01E-09	1.20E-08	7.59E-09	7.84E-10

Fuente: Sandia National Laboratories (2012).