



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

DESARROLLO DE MODELOS PARA ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD  
NIVEL 3

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
INGRID DOROTEO REYES

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. PAMELA FRAN NELSON EDELSTEIN  
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Francois Lacouture Juan Luis

Secretario: M. en C. Salazar Salazar Edgar

1er. Vocal: Dra. Nelson Edelstein Pamela Fran

2do. Vocal: Dr. Cruz Gómez Modesto Javier

3er. Vocal: M.C. Viais Juárez Jorge

Lugar donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. PAMELA FRAN NELSON EDELSTEIN

-----  
**FIRMA**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1.	OBJETIVOS .....	12
1.2.	JUSTIFICACIÓN .....	13
1.3.	ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	13
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD .....	14
2.2.	HISTÓRICO: AVANCES EN ANÁLISIS DE RIESGO, INDUSTRIA NUCLEAR.....	15
2.2.1.	WASH-1400 REACTOR SAFETY STUDY .....	16
2.2.2.	APLICACIONES ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD NIVEL TRES.....	16
2.3.	METODOLOGÍA .....	17
2.4.	APS: INTEGRACIÓN DE LOS NIVELES 1, 2 Y 3 .....	17
2.5.	ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS .....	19
2.5.1.	CÓDIGOS UTILIZADOS PARA DESARROLLAR UN ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS <sup>[2,3]</sup> .....	20
2.6.	DOCUMENTO DE INFORMACIÓN TÉCNICA 14844 <sup>[5]</sup> : POSTULACIÓN DE UN ACCIDENTE MAYOR 22	
2.7.	TÉRMINO FUENTE.....	25
2.8.	LERF <sup>[6]</sup> .....	28
2.9.	CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS .....	29
2.10.	EFFECTOS DE LA RADIACIÓN .....	29
2.11.	EVALUACIÓN DE DOSIS .....	30
2.12.	RIESGOS PARA LA SALUD .....	31
2.13.	IMPORTANCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA <sup>[7]</sup> .....	31
2.14.	EMERGENCIA GENERAL .....	35
2.15.	ESCALA INES.....	36
2.16.	CLASIFICACIÓN DE DOSIS (Exposición Aguda) .....	38
2.17.	PROTECCIÓN RADIOLÓGICA .....	40
2.17.1.	ACCIONES PROTECTORAS .....	41
2.17.2.	ZONAS DE PROTECCIÓN (SEGOB, 2014):.....	41
2.17.3.	PLAN DE EMERGENCIA RADIOLÓGICA EXTERNO (PERE).....	42
2.17.4.	PROCEDIMIENTOS DE EVACUACIÓN .....	45
2.18.	NRC: 10 CFR 100.11 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE EXCLUSIÓN, ZONA DE BAJA POBLACIÓN Y DISTANCIA A UN CENTRO POBLACIONAL.....	45
<b>3.</b>	<b>CÓDIGOS DE SALUD FÍSICA HOTSPOT .....</b>	<b>48</b>
3.1.	REQUERIMIENTOS/DATOS DE ENTRADA .....	48
3.2.	ELEMENTOS METEOROLÓGICOS.....	50
3.3.	SIMULACIÓN .....	51
3.4.	METEOROLOGÍA .....	52
3.5.	RECEPTORES DE RADIACIÓN.....	53
3.6.	BIBLIOTECA DCF (DOSE CONVERSION FACTORS).....	53
3.7.	RESULTADOS HOTSPOT PARA I-131.....	55
3.7.1.	MÁXIMA EXPOSICIÓN .....	56
3.7.2.	GRÁFICO: ÁREA DE DOSIS MÁXIMA.....	56
3.7.3.	DOSIS EQUIVALENTE TOTAL COMPROMETIDA EN ÓRGANOS (superior a 50 rem/0.5 Sv) .....	59
3.7.4.	MINIMA EXPOSICIÓN.....	59
3.7.5.	TOTAL DE DOSIS EQUIVALENTE COMPROMETIDA EN ÓRGANOS (superior a 50 rem/0.5 Sv) ..	62
<b>4.</b>	<b>MELCOR ACCIDENT CONSEQUENCE CODE SYSTEM (MACCS) .....</b>	<b>63</b>

4.1.	MÓDULO ATMOS: TRANSPORTE ATMOSFÉRICO Y DEPOSICIÓN .....	65
4.2.	MÓDULO EARLY: CÁLCULOS PARA FASE DE EMERGENCIA.....	65
4.3.	MÓDULO CHRONC: FASE A LARGO PLAZO .....	65
4.3.1.	DOSIS AGUDAS.....	66
4.3.2.	DOSIS DE POR VIDA .....	66
4.4.	MODELADO FENOMENOLÓGICO.....	66
4.5.	RÉGIMENES FENOMENOLÓGICOS DE APLICABILIDAD.....	67
4.6.	DATOS DE ENTRADA: DATOS METEOROLÓGICOS .....	68
4.7.	DATOS DE ENTRADA: FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS (DCF) .....	68
4.8.	DATOS DE ENTRADA: INFORMACIÓN DEL SITIO .....	70
4.9.	DATOS DE ENTRADA: PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE UNA LIBERACIÓN.....	71
4.10.	PROCESAMIENTO DE DATOS DE SALIDA.....	72
4.11.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA PLUMA .....	72
4.12.	RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL MÓDULO "ATMOS".....	80
4.13.	RESULTADOS MÓDULO "ATMOS" PARA I-131.....	80
4.14.	ESCENARIOS DE EMERGENCIA PARA EL MÓDULO EARLY.....	83
4.15.	CÁLCULO DE DOSIS .....	83
4.16.	EXPOSICIÓN Y EVACUACIÓN .....	84
4.17.1.	ESCENARIOS DE RESPUESTA A EMERGENCIA: EARLY.....	85
4.17.2.	CÁLCULO DE DOSIS PARA POBLACIONES EVACUADAS Y REUBICADAS.....	87
4.17.	CÁLCULO DE EFECTOS TEMPRANOS .....	88
4.18.	RESULTADOS GENERADOS POR EL MÓDULO EARLY .....	89
4.19.	RESULTADOS GLOBALES DEL MÓDULO "EARLY" .....	91
4.20.1.	RESULTADOS ACCIDENTE MÁXIMO CREÍBLE (50 % I, 33 % Cs) .....	93
4.20.2.	RESULTADOS LIBERACIÓN SUPERIOR AL 10% DEL INVENTARIO INICIAL DE Cs-I (15%) .....	93
4.20.3.	RESULTADOS LIBERACIÓN SUPERIOR AL 1% E INFERIOR AL 10% (5%) .....	94
4.20.4.	RESULTADOS LIBERACIÓN INFERIOR AL 1%.....	94
4.20.	ANÁLISIS DE RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL MÓDULO EARLY PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE INVENTARIO LIBERADO .....	95
4.21.	COMBINACIONES DE FRACCIONES DE PONDERACIÓN PARA DOS RESPUESTAS A ESCENARIOS DE EMERGENCIA Y SU INFLUENCIA EN LOS EFECTOS A LA SALUD.....	101
4.22.	MÓDULO CHRONC.....	108
4.23.1.	FASE INTERMEDIA.....	108
4.23.2.	FASE A LARGO PLAZO.....	108
4.23.	DECISIONES DE HABITABILIDAD (ACCIONES DE DESCONTAMINACIÓN).....	109
4.24.	INFORMACIÓN SOBRE COSTOS DE ACCIONES PROTECTIVAS Y REPARADORAS .....	110
4.25.	RESULTADOS MÓDULO CHRONC.....	110
4.25.1.	DOSIS TOTALES A LARGO PLAZO DE TODAS LAS VÍAS.....	110
4.25.2.	CONTAMINACIÓN POR CONSUMO DE CULTIVOS, LECHE Y CARNE. ....	111
4.25.3.	DISTANCIA CUBIERTA POR ACCIONES DE PROTECCIÓN.....	111
4.25.4.	ÁREA/POBLACIÓN AFECTADAS POR ACCIONES DE DESCONTAMINACIÓN A LARGO PLAZO. 112	
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>118</b>
	<b>TÉRMINOS Y DEFINICIONES .....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>133</b>
	<b>APÉNDICE .....</b>	<b>136</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 APS Integración Niveles 1 y 2 para input Nivel 3.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2 Procesos básicos que ocurren después una liberación y vías consideradas para cálculo de dosis Fuente: Nuclear Regulatory Research .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3 Modelo utilizado por los códigos computacionales para Análisis de Consecuencias.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4 Clasificación de Dosis .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5 Ejemplo de dosis fuertes.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 6 Ubicación de venteos en la contención primaria y los procesos por los que podría darse una liberación de radionúclidos. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 7 Zonas de cavidad y estela de una construcción .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 8 Radios: Zonas de protección.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 9 Radios: Zonas de protección (zoom) .....</i>	<i>123</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Criterios por tiempo de liberación de Productos de Fisión. ....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2 Criterios por magnitud de liberación de PF Fuente: IIE, Actualización del Examen Individual de Planta Nivel 2 de la CNLV U-1.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3 Secuencias que más contribuyen a la frecuencia de liberación Fuente: IIE, Actualización del Examen Individual de Planta Nivel 2 de la CNLV U-1 .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 4 Clasificación INES en función del material liberado a la atmósfera Fuente: www.iaea.org</i>	

38

<i>Tabla 5 Inventario Radionúclidos en CNLV utilizado en la simulación .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6 Datos de término fuente.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 7 Datos de Meteorología.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 8 Datos Receptores de Radiación .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9 HotSpot Opciones FGR.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10 Datos de entrada.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 11 Aspectos a considerar en algunas variables que intervienen en el análisis .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 12 Perímetro de Dosis Máxima Exposición.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 13 Resultados Máxima Exposición Línea Central .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 14 Resultados Máxima Exposición (Línea Central).....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 15 Perímetros de Dosis Mínima Exposición.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 16 Resultados Mínima Exposición (TED) .....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 17 Resultados Mínima Exposición en Línea Central .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 18 Nucleídos utilizados en el Análisis de Consecuencias en MACCS .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 19 Órganos considerados en la generación de DCFs.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 20 Casos de Análisis.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 21 Valores de TED (Velocidad de viento 4.5 m/s).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 22 Valores de TED (Velocidad de viento 2.3 m/s).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 23 Factores de Dilución (velocidad de viento 4.5 m/s).....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 24 Factores de Dilución (velocidad de viento 2.3 m/s).....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 25 Concentración a nivel del suelo (velocidad de viento 4.5 m/s).....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 26 Concentración a nivel del suelo (2.3 m/s).....</i>	<i>78</i>

<i>Tabla 27 Resultados Pluma 3.22-4.02 km I-131</i> .....	80
<i>Tabla 28 Resultados Pluma 5.6-8.1 km I-131</i> .....	81
<i>Tabla 29 Resultados Pluma 11.27-16.02 km</i> .....	81
<i>Tabla 30 Resultados Pluma 16.09-20.92 km</i> .....	81
<i>Tabla 31 Resultados Pluma 25.8-32.2 km</i> .....	82
<i>Tabla 32 Resultados Pluma 48.3-64.4 km</i> .....	82
<i>Tabla 33 Resultados Pluma 64.37-80.47 km</i> .....	82
<i>Tabla 34 Evacuación vs Reubicación</i> .....	85
<i>Tabla 35 Resultados Accidente Máximo Creíble</i> .....	93
<i>Tabla 36 Resultados Liberación Superior al 10%</i> .....	93
<i>Tabla 37 Liberación Superior al 1%</i> .....	94
<i>Tabla 38 Resultados Liberación inferior al 1%</i> .....	94
<i>Tabla 39 Concentración en Aire Integrada en el tiempo (% de Inventario Liberado)</i> .....	95
<i>Tabla 40 Dosis Máxima Individual Cuerpo Completo (% de inventario Liberado)</i> .....	96
<i>Tabla 41 Muertes Latentes por cáncer (% de Inventario Liberado)</i> .....	97
<i>Tabla 42 Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer (% de Inventario Liberado)</i> .....	98
<i>Tabla 43 Dosis máxima Individual TIROIDES (% de Inventario Liberado)</i> .....	99
<i>Tabla 44 Riesgo Individual de Desarrollar Cáncer de Tiroides (% inventario liberado)</i> .....	100
<i>Tabla 45 Dosis Máxima Total Individual Cuerpo Completo (escenarios de respuesta)</i> .....	102
<i>Tabla 46 Riesgo Individual de Desarrollar Cáncer de Tiroides (escenarios de respuesta a emergencia)</i>	103
<i>Tabla 47 Muertes Latentes por cáncer (escenarios respuesta a emergencia)</i> .....	104
<i>Tabla 48 Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer (escenarios respuesta a emergencia)</i> .....	105
<i>Tabla 49 Dosis Máxima Individual TIROIDES (escenarios respuesta a emergencia)</i> .....	106
<i>Tabla 50 Tiempo de arribo de la pluma</i> .....	113
<i>Tabla 51 Resultados Efectos Tempranos, módulo CHRONC (0-80.5 km)</i> .....	113
<i>Tabla 52 Dosis Poblacional Comprometida Cuerpo Completo (todas las vías), Módulo CHRONC (0-80.5 km)</i>	114
<i>Tabla 53 Dosis Anual Máxima en alimentos, Módulo CHRONC (0-80.5 km)</i> .....	115
<i>Tabla 54 Distancia Máxima de Acciones a Largo Plazo, MÓDULO CHRONC</i> .....	116
<i>Tabla 55 Población/Área afectada por las Acciones de Descontaminación (0-80.5 km)</i> .....	116
<i>Tabla 56 Población Evacuada y Reubicada (0-80.5 km)</i> .....	117
<i>Tabla 57 Dosis Máxima individual, radios: zonas de protección</i> .....	122
<i>Tabla 58 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Accidente Máximo Creíble”</i> .....	136
<i>Tabla 59 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Liberación superior al 10%”</i> .....	137
<i>Tabla 60 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Liberación superior 1% inferior 10%”</i> .....	138
<i>Tabla 61 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Liberación inferior al 1%”</i> .....	139

## LISTA DE ACRÓNIMOS

- AEC** Atomic Energy Commission (Comisión de Energía Atómica)
- ALARA** As Low As Reasonably Achievable (Tan Bajo como sea Razonablemente Posible)
- ALI** Annual Limit on Intake (Límite Anual de Ingesta)
- APS** Análisis Probabilístico de Seguridad
- ARS** Accute Radiation Syndrome (Síndrome de Radiación Aguda)
- ATWS** Transitorio Esperado sin Apagado
- BWR** Boiling Water Reactor (Reactor de Agua Hirviente)
- CCDF** Cumulative Distribution Function (Función de Distribución Acumulativa Complementaria)
- CDF** Core Damage Frequency (Frecuencia de Daño al Núcleo)
- CNLV** Central Nucleoeléctrica Laguna Verde
- CNSNS** Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
- DAC** Derivated Air Concentration (Concentración Derivada en Aire)
- DCF** Dose Conversion Factors (Factores de Conversión de Dosis)
- DOE** Department of Energy (Departamento de Energía)
- EDP** Estados de Daño de Planta
- EIS** Estudios de Impacto Ambiental
- EPA** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
- EPZ** Zona de Planificación y Emergencia
- FGR** Federal Guidance Reports (Guía de Reportes Federales)
- FSAR** Final Safety Analysis Report (Reporte Final de Análisis de Seguridad de la CNLV)
- HPCS** High Pressure Control Systems (Sistema de Rocío del Núcleo a Alta Presión)
- ICRP** International Commission on Radiological Protection (Comisión Internacional de Protección Radiológica)
- IIE** Instituto de Investigaciones Eléctricas



**INES** International Nuclear Event Scale (Escala Internacional de Eventos Nucleares y Radiológicos)

**LCF** Latent Cancer Fatalities (Muertes latentes por cáncer)

**LERF** Large-Early Release Frequency (Frecuencia de Liberación Grande Temprana)

**LOCA** Loss of Coolant Accident (Accidente con Pérdida de Refrigerante)

**MACCS** Sistema de Códigos para Análisis de Consecuencias MELCOR

**MOI** Maximally Exposed offsite Individual (Individuo externo expuesto a la dosis máxima)

**MSIV** Main Steam Isolation Valves (Válvulas de Aislamiento de Vapor Principal)

**NAE** Niveles de Acción de Emergencia

**NBS** Oficina Nacional de Estándares

**NCRP** National Council On Radiation Protection (Comité Nacional de Protección contra la Radiación)

**NEPA** National Environmental Policy (Ley Nacional de Política Ambiental)

**NRC** Nuclear Regulatory Commission (Comisión Reguladora Nuclear)

**OE** Procedimientos de Operación de Emergencia

**PAG** Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents

**PERE** Plan de Emergencia Radiológica Externo

**PF** Productos de Fisión

**PWR** Pressurized Water Reactor (Reactor de Agua a Presión)

**QHO** Objetivos Cuantitativos a la Salud Quantitative Health Objectives

**SRP** Standard Review Plan (Plan de Revisión Estándar)

**TEDE** Total Effective Dose Equivalent (Equivalente Total de Dosis Efectiva)

**TED** Total Effective Dose (Dosis Efectiva Total)

**UNSCEAR** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de las radiaciones nucleares)

**USAEC** U.S. Army Environmental Command

# 1. INTRODUCCIÓN

El Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) es una metodología de análisis de riesgo y un pilar clave del establecimiento y regulación de las políticas de seguridad operacional para la NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) de los EUA, el cual plantea la pregunta: “si podemos cuantificar el riesgo, ¿qué es un nivel de riesgo “aceptable”?”

La NRC consagró el APS como parte permanente de su política regulatoria, publicando una declaración en 1995 que decía en parte: El uso de APS debe aumentar en la medida en que esté apoyado por el estado del arte e información, en una forma complementaria de la filosofía de defensa en profundidad.

En la Declaración de Política de Objetivos de Seguridad de 1986, la NRC respondió a la pregunta “¿Qué tan seguro es lo suficientemente seguro?”, ésta incluía dos objetivos cualitativos:

Primero: Los miembros individuales del público deben ser provistos de protección contra las consecuencias de la operación de una planta de energía nuclear, tal que, las personas no tengan un riesgo adicional significativo para vida o salud y segundo; que los riesgos sociales para la vida y salud a partir de la operación de una planta de energía nuclear deben ser comparables o menores a los riesgos de generar electricidad por tecnologías competidoras viables y no representar una adición significativa a otros riesgos sociales.

Además de estos otros dos objetivos cuantitativos correspondientes (Quantitative Health Objectives, QHOs):

1. El riesgo de “muerte temprana” para un individuo promedio en las cercanías de una planta de energía nuclear que podría resultar de los accidentes en el reactor, no debe exceder 0.1% de la suma de los riesgos de “muertes tempranas” resultantes de otros accidentes a los cuales la población de EUA esté generalmente expuesta (aproximadamente  $5 \times 10^{-7}$ /año) y;
2. El riesgo de “muerte por cáncer” para la población local que podría resultar de la operación de una planta de energía nuclear, no debe exceder 0.1 % de la suma de los riesgos de muerte por cáncer resultado de otras causas (aproximadamente  $2 \times 10^{-6}$ /año).

Estos QHO fueron respaldados por dos objetivos sustitutos:

Una frecuencia de daño al núcleo (CDF) de  $10^{-4}$ /reactor/año y una Frecuencia de Liberación Grande Temprana (LERF) de  $10^{-5}$ / reactor/año.

En el documento “Implementación de metas de seguridad” de 1990, la NRC aprueba los objetivos que conciernen a CDF y LERF, estos objetivos son más fáciles de dirigir porque el Nivel 3 del APS no es requerido. Son llamados objetivos

sustitutos porque son usados como alternativas de los QHOs. Son llamados además objetivos numéricos sustitutos porque apoyan los QHOs. Se afirma que son más conservadores que los QHOs originales con base a lo que ahora se sabe sobre exposiciones públicas cuando accidentes severos ocurren y se toman acciones de protección. Al satisfacerse los criterios para CDF y LERF se considera que los QHOs serán cumplidos sin necesidad de elaborar un Nivel 3 para comprobarlo.

El uso de CDF y LERF se establecen en el USNRC SRP (*Standard Review Plan*) como bases para los lineamientos de APS para la aceptabilidad de principios en regulación del riesgo: “Cuando los cambios propuestos, resultan en un incremento del CDF, el incremento debería ser pequeño y consistente con el propósito de la Declaración de Política de Objetivos de Seguridad”. El SRP además indica que el uso de QHOs en lugar de LERF es aceptable en principio y los licenciarios pueden proponer su uso. Sin embargo, en la práctica, implementar dicho enfoque requeriría una extensión al Nivel 3, en cuyo caso los métodos y suposiciones utilizados en el APS y las incertidumbres asociadas requerirían atención adicional <sup>[1]</sup>.

El Nivel 3 también conocido como Análisis de Consecuencias, estima los riesgos a la salud del público y algunas veces otros riesgos sociales, puede proveer conocimientos de la importancia relativa de la prevención y mitigación de riesgos expresada en términos de las consecuencias adversas tales como: los efectos en la salud del público o la contaminación de la tierra, aire, agua o alimentos.

El Registro Central del DOE (Departamento de Energía de EUA), o Toolbox <sup>[2]</sup> contiene una cantidad de códigos informáticos que cumplen con los requisitos de garantía de calidad de software. Los tres códigos enumerados a continuación están aprobados para su uso en dispersión atmosférica y cálculos radiológicos de las consecuencias para respaldar los análisis de seguridad de sus instalaciones.

- Sistema de Software de dosimetría de radiación ambiental generalizada GENNII (V2.10.1)

Y los que se utilizaron en este trabajo de tesis:

- Códigos de Salud Física HotSpot (Versión 3.0)
- Sistema de Códigos para Análisis de Consecuencias MELCOR (MACCS2) Versión 1.13

Para los Análisis de Consecuencias Nivel 3 en plantas de energía nuclear, los principales pasos de cálculo están incorporados en códigos de computadora, tales como:

- MACCS & MACCS2 (EUA)
- COSYMA (Comisión Europea)
- ARANO (Finlandia)

- LENA (Suecia)
- OSCAAR (Japón)

Estos códigos emplean un modelo de dispersión Gaussiano en estado estacionario para hacer una mejor estimación de los efectos de la radiación asociados con la liberación atmosférica de materiales radiactivos. Incluyen todas las vías relevantes de dosis: *cloudshine*, inhalación, contaminación de la piel, resuspensión, *groundshine* e ingestión.

Utilizando un modelo de transporte y dispersión de última generación, se calcula la contaminación del terreno y las concentraciones cerca del suelo de todos los radionúclidos relevantes para un año de situaciones meteorológicas diferentes, climatológicamente representativas para los 16 sectores en un área de 80 km más allá de la fuente.

Las dosis de radiación se derivaron de esto con un modelo de dosis y se compararon con los límites y niveles de dosis para determinar los efectos tempranos a la salud, así como las acciones de protección a la población (evacuación, descontaminación, condena) determinadas por MACCS para las dosis a largo plazo.

Hay numerosos factores que influyen en el cálculo de consecuencias: las características físicas del término fuente, la naturaleza de la respuesta a la emergencia tomada para mitigar las consecuencias de accidente, la demografía del sitio y meteorología.

Tres factores primarios: magnitud de la liberación, tiempo de liberación y la respuesta a emergencias. Junto con la demografía y meteorología del sitio, mezclar varias combinaciones de valores de variables representativas, por ejemplo, gran magnitud/liberación tardía/respuesta rápida como la mencionada en NUREG-1150 (Riesgo de Accidente Severo: un análisis para cinco plantas nucleares de los Estados Unidos), para obtener el pico de consecuencias a corto y largo plazo después de una liberación accidental.

El nivel 3 proporciona los cálculos fenomenológicos de apoyo al Nivel 2, proporcionando información cuantitativa al árbol de progresión de eventos y al modelo de término fuente. Sin embargo, la incertidumbre asociada con los resultados del código debe ser considerada en el uso de los resultados para poder ser integrados en el Nivel 3 como valores de riesgo (probabilidad x consecuencias) lo cual no se aborda en este trabajo, solamente resultados cuantitativos proporcionados por los códigos.

En este trabajo de tesis se desarrollaron:

1. La simulación en el código Hotspot donde se libera 1% del inventario del núcleo, equivalente a un accidente INES 6. Obteniendo Dosis Equivalentes Comprometidas en órganos, además de las dosis por Inhalación, *groundshine* y resuspensión para la población dentro de 85 km de distancia de la fuente.

2. Análisis de Sensibilidad de la Pluma. Incorporado para observar los efectos de la flotabilidad, dimensiones iniciales de la pluma y los efectos de estela en cada tipo de pluma modelada.

3. Simulación en MACCS de 4 liberaciones accidentales de acuerdo con las características del término fuente (porcentaje de inventario liberado) en las secuencias que más contribuyen a la frecuencia de daño al núcleo, determinadas en el Nivel 2.

De los cuales, se obtuvieron resultados para efectos tempranos a la salud y dosis a largo plazo para determinar acciones de protección a la población. Las distancias para tomar la ubicación como medida de protección durante la fase temprana se calculan usando estos códigos.

Así mismo se realizaron combinaciones de respuesta a emergencia (evacuación) para ilustrar su importancia en el cálculo de efectos tempranos a la salud y del área afectada por labores de descontaminación.

Entre las consecuencias obtenidas, se encuentran los factores de riesgo para muerte temprana, cánceres latentes (fatal o no fatal) y de muerte por cáncer, los cuales son condicionales de la exposición a una dosis de 1 Sv, no se deben considerar aún como el valor de riesgo de muerte temprana o de cánceres latentes total del nivel 3.

## 1.1. OBJETIVOS

### GENERAL

- Desarrollar los modelos de APS Nivel 3 en los códigos HotSpot y MACCS para estimar las dosis recibidas por la población en un evento de liberación accidental, además de analizar las variables involucradas en estos resultados y el alcance de estos códigos para el Análisis de Consecuencias.

### PARTICULARES

- Simular posibles liberaciones de productos de fisión desde la contención debido a un accidente y conocer sus efectos sobre la población y el medio ambiente a corto y largo plazo.
- Obtener la estimación más realista posible de una liberación proveniente de reactor BWR, considerando el análisis de las consecuencias dentro de un radio de 80 km a la redonda.
- Estimar los impactos adversos debido a la contaminación de la propiedad, la tierra y los mantos freáticos.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, las aplicaciones de APS en las centrales nucleares han experimentado una aceptación y un uso cada vez mayores, particularmente al abordar cuestiones regulatorias. Aunque el progreso del APS ha sido impresionante, el uso de métodos e ideas de APS para abordar cuestiones normativas cada vez más amplias ha dado lugar a la necesidad de una mejora continua y una expansión de los métodos de APS para satisfacer las necesidades del Regulador y la industria nuclear en México.

Para nuestro país que sigue la regulación de los Estados Unidos de América en materia nuclear es importante contar con los conocimientos en los tres niveles de APS. Actualmente la Central Laguna Verde cuenta con los estudios de Nivel 1 y 2, por lo que se espera el trabajo en el Nivel 3 esté muy próximo a realizarse. Es necesario reunir conocimientos y familiarizarse con los códigos existentes para el Nivel 3 y los términos y conceptos relacionados con el mismo.

Algunas de las necesidades para la aplicación de APS Nivel 3, son las relacionadas a Seguridad Física, ya que, se busca reducir de manera importante la necesidad de esta en las instalaciones de plantas de 4ta. Generación, o bien propuestas de modificaciones a la zona de exclusión, ya definida, a partir de la determinación de consecuencias. Además, puede ser utilizado para la elaboración de planes de evacuación y protección para la población cercana a la planta.

## 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El capítulo 2 pertenece al Marco Teórico dónde se da una descripción detallada de los tres niveles del Análisis Probabilístico de Seguridad, su desarrollo a través de los años y las aplicaciones del Nivel 3. Se define el término fuente y los posibles efectos radiológicos de una liberación accidental de productos de fisión sobre la población, así como las vías consideradas para cálculo de Dosis.

El capítulo 3 describe el desarrollo de la simulación en el código HotSpot de una liberación accidental de 1% de Cs-I y se presentan los resultados de dosis equivalente total en órganos en un escenario de Máxima y Mínima exposición, determinado por la altura de la pluma.

En el capítulo 4 se presenta la simulación en MACCS de 4 liberaciones accidentales de acuerdo con las características del término fuente (porcentaje de inventario liberado) de las secuencias que más contribuyen a la frecuencia de daño al núcleo, determinadas en el Nivel 2.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presenta la discusión de resultados y las conclusiones.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD

El Análisis Probabilístico de Seguridad proporciona una aproximación exhaustiva y estructurada para representar escenarios de accidente.

Generalmente se utilizan para evaluar los riesgos relativos que poseen diversos tipos de operaciones e instalaciones, para comprender la importancia relativa de los contribuyentes del riesgo y para obtener información sobre posibles mejoras de seguridad. El objetivo principal es obtener información que pueda usarse para minimizar las posibilidades de accidentes o minimizar los impactos de accidentes que puedan ocurrir.

El primer paso consiste en identificar los escenarios de accidente que exceden el umbral de consecuencias que nos interesan por medio de un modelo lógico llamado Árbol de Eventos.

Estos accidentes tienen que representarse en términos de combinaciones de eventos o fallas para los cuales sea posible obtener su probabilidad de ocurrencia. (Árbol de fallas).

Los escenarios y combinaciones de fallas determinados pueden llevar a una amplia variedad de consecuencias. El análisis de consecuencias se hace por medio de simulación de los procesos físicos involucrados en la progresión del accidente. En el caso de centrales nucleares se ha definido una estrategia de tres niveles para atacar el análisis de consecuencias.

Un APS de Nivel 1 identifica las secuencias de eventos que pueden conducir a un daño del núcleo del reactor. Este puede entregar conocimientos importantes de las fortalezas y debilidades del diseño y en los métodos de prevenir daños al núcleo.

Un APS de Nivel 2 identifica en qué forma pueden ocurrir las liberaciones radiactivas de las plantas y estima sus magnitudes y frecuencias, analiza la fenomenología del progreso de la fundición del núcleo.

Un APS de Nivel 3 (Análisis de Consecuencias) estima los riesgos a la salud del público, y algunas veces otros riesgos sociales, y pueden proveer conocimientos de la importancia relativa de la prevención y mitigación de riesgos expresada en términos de las consecuencias adversas tales como los efectos en la salud del público o la contaminación de la tierra, aire, agua o alimentos.

El Análisis Probabilístico de Seguridad, es una metodología de análisis de riesgo y un pilar clave del establecimiento y regulación de las políticas de seguridad operacional para la NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) de los EUA. Como parte del Marco Regulatorio proporciona un nivel de importancia del riesgo para asignar



de manera más eficiente los recursos para inspecciones, mantenimiento, operación, diseño y regulación para una central nuclear.

## 2.2. HISTÓRICO: AVANCES EN ANÁLISIS DE RIESGO, INDUSTRIA NUCLEAR

A continuación se enlistan las publicaciones más significativas en materia de análisis de riesgos en la industria nuclear:

- 1946 la Comisión de Energía Atómica (AEC) fue establecida
- 1946 el Comité Nacional de Protección contra la Radiación (NCRP) recomendaba los límites para exposición ocupacional
- 1947-1948 la Comisión de Energía Atómica, establece el Comité de Salvaguardias del Reactor, el cual más tarde se convertiría en el Comité Asesor de Salvaguardias del Reactor, el cual revisa y resuelve cuestiones técnicas clave relacionadas con la regulación de centrales nucleares
- 1950- Publicación de los límites de dosis máximos permisibles (Oficina Nacional de Estándares – NBS)
- 1957-USAEC (*U.S. Army Environmental Command*) publica WASH-740, “Posibilidades teóricas y consecuencias de accidentes mayores en grandes centrales nucleares”
- 1958- ACRS establece la metodología “Accidente Máximo Creíble”, utilizado para evaluar la aceptabilidad del sitio.
- 1961- 10CFR100, “Criterio de Sitio del Reactor”
- 1962- TID-14844, “Cálculo de Factores Distancia para Reactores de Potencia y Prueba”, USAEC
- 1964- Guías Regulatorias 1.3 y 1.4
- 1971- Desarrollo de USAEC “*Realistic*” *assessment assumptions* (NEPA)
- Apéndice D.”10CFR50”, definición de nueve categorías de accidentes, categoría 9 “muy seria” con potencial de consecuencias severas, más allá del accidente Base de Diseño
- 1975- Desarrollo de WASH-1400 “Estudio de Seguridad del Reactor Cálculo de Consecuencias de Accidentes”, asignación de distribución de probabilidad para variables clave: magnitud de liberación, condiciones meteorológicas, población.
- 1982- USNRC- “Desarrollo de Términos Fuente de Accidente Severo: 1957-1981” NUREG-0773
- 1990- NUREG-1150 “Riesgo de Accidente Severo: un análisis para 5 Plantas Nucleares de los Estados Unidos”, 5 principales pasos de Análisis de Riesgo (Frecuencia de Accidentes, Progresión de



Accidentes, Transporte de material radiactivo, Análisis de Consecuencias fuera de sitio, Integración del Riesgo)

- 1995: Estudio NUREG-1465: Términos Fuente de accidentes para plantas de energía nuclear de agua ligera [3].

### 2.2.1. WASH-1400 REACTOR SAFETY STUDY

Primer estudio de riesgo probabilístico integral de los accidentes hipotéticos de centrales nucleares, el cual hizo uso del código CRAC, se desarrolló para calcular las consecuencias sanitarias y económicas de las liberaciones accidentales de material radiactivo a la atmósfera.

Antes de este estudio de seguridad del reactor, el tema principal de los análisis de seguridad para las instalaciones nucleares estaba en evaluar la adecuación de emplazamiento y diseño de las instalaciones para garantizar que el público este protegido contra posibles accidentes.

Estos análisis de “base de autorización”, cómo lo llama la 10CFR100 (Criterio de Sitio de Reactor) se centran en las dosis máximas fuera del sitio a las que podría enfrentarse por la población en caso de accidentes de base de diseño (DBA).

Los DBA se eligen típicamente para representar los límites de diseño de la instalación, por ejemplo, un accidente con pérdida de refrigerante (LOCA) de una gran ruptura en un reactor comercial. El análisis de estos accidentes está documentado en el informe de análisis de seguridad (FSAR) de la instalación. La operación de centrales eléctricas comerciales requiere la aprobación de sus FSARs por la Comisión de Regulación Nuclear (NRC). Los métodos analíticos utilizados para demostrar el cumplimiento de los requisitos aplicables eran simples.

Como resultado de éste y otros factores, se desarrolló un interés en métodos de análisis más realistas para que se pueda obtener una imagen precisa de los riesgos que plantea la operación de estas instalaciones.

Desde su inicio en 1975, el modelado probabilístico de consecuencias ha recibido mucha atención y aplicación en todo el mundo y un gran número de modelos de consecuencias han sido desarrollados [3].

### 2.2.2. APLICACIONES DEL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD NIVEL TRES

Se usa Nivel 3 para cuantificar el riesgo asociado de una variedad de fuentes en el sitio de la planta. Estas fuentes incluyen el núcleo del reactor, la alberca de combustible gastado y almacenamiento de combustible gastado. Se puede usar para cuantificar las consecuencias en el sitio o fuera del sitio, el enfoque principal está en las consecuencias fuera del sitio.

Puede ser usado para cuantificar el riesgo que representan (1) eventos internos; (2) peligros externos, que incluyen eventos sísmicos, inundaciones, incendios externos, fuertes vientos, (3) otros peligros.

El modelado de consecuencias tiene muchas aplicaciones, incluyendo las siguientes:

- a) Evaluación genérica de riesgo o de un sitio específico de forma individual o para la población en general
- b) Evaluación de impacto ambiental debido a un accidente severo
- c) Procedimientos regulatorios
- d) Planes de respuesta a emergencias
- e) Desarrollo de criterios para la aceptabilidad del riesgo
- f) Necesidades de instrumentación y evaluación de dosis
- g) Planes de evacuación
- h) Estudios de costo-beneficio

En la mayoría de estos análisis, el Nivel 3 no es indispensable para su desarrollo, pero resulta una herramienta que de contar con ella facilitaría su realización.

### 2.3. METODOLOGÍA

Basada en el documento “*Standard for Radiological Accident Offsite Consequence Analysis (Level 3 PRA) to Support Nuclear Installation Applications*” [2].

Los requisitos técnicos están organizados por sus respectivos elementos técnicos. Estos elementos definen el alcance del análisis para un Nivel 3.

El uso principal de esta Norma para Nivel 3 son Reactores de Agua Ligera, la metodología es aplicable a cualquier tipo de material radiactivo liberado a la atmósfera para el cual se pueden definir las características de liberación.

Los tipos de aplicaciones APS bajo esta norma son muy amplias e incluyen aplicaciones relacionadas con diseño, planificación de emergencias, licenciamiento y otras disciplinas.

Se contemplan tanto las solicitudes reglamentarias como las que no lo son, por ejemplo, las de re-licenciamientos a cargo de la NRC y por otro lado los estudios de reaseguramiento. Un análisis de Nivel 3 puede satisfacer los requisitos técnicos en varios niveles de detalle [4].

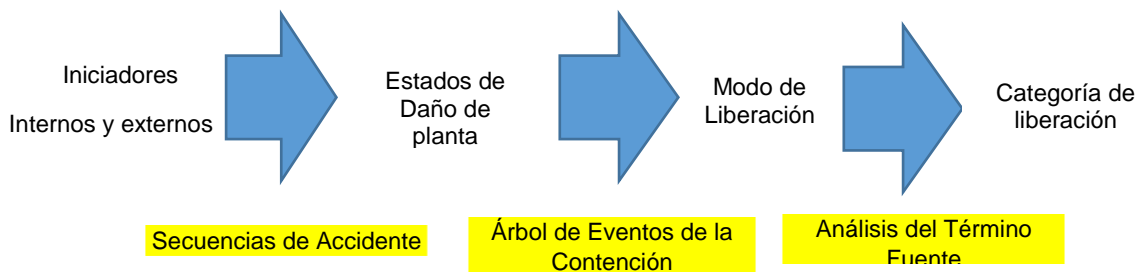
### 2.4. APS: INTEGRACIÓN DE LOS NIVELES 1, 2 Y 3

El nivel 3 incorpora la transición de los resultados de la definición de Estados de Daño de la Planta, la categorización de liberaciones y la determinación del término fuente del nivel 2.

La evaluación integrada de riesgos en este nivel, consiste en la combinación de varios análisis, por ejemplo, análisis de frecuencia de accidentes, análisis de progresión de accidentes, análisis del término fuente y el análisis de consecuencias para formar una expresión del riesgo que incluye contribuciones de todos los iniciadores.

- Identificación y determinación de la frecuencia de las secuencias de accidente que conducen a daño del núcleo que son iniciados por eventos internos y externos en el Nivel 1 (Sismo, Fuego, Inundación, Transitorio esperado sin apagado (ATWS por sus siglas en inglés), Accidente con pérdida de refrigerante (LOCA por sus siglas en inglés) y Transitorios).
- Agrupamiento de los conjuntos de corte que están asociados con las secuencias de accidente dentro de los Estados de Daño de Planta (EDP) donde cada EDP presenta condiciones iniciales y limitantes únicas para el análisis de progresión de accidentes.
- Identificación y determinación de las probabilidades condicionales de la gran cantidad de posibles caminos que se siguen en un análisis de progresión de accidentes posterior al daño del núcleo. Se utiliza un árbol de eventos de progresión de accidentes detallado (Árbol de Eventos de la Contención).
- Agrupamiento de los cientos de modos de progresión de accidentes que representan condiciones únicas para el análisis de términos fuente.
- Estimación de los términos fuente.
- Los cientos de términos fuente que son generados en el respectivo análisis son entonces combinados dentro de grupos de términos fuente basados en características similares entre ellos.
- Las consecuencias son calculadas para cada grupo de términos fuente.

En la Figura 1 APS Integración Niveles 1 y 2 para input Nivel 3 se muestra de manera condensada la forma en la que los niveles 1 y 2 se integran para conformar las Categorías de Liberación que se utilizarán como input del Nivel 3.



**Figura 1 APS Integración Niveles 1 y 2 para input Nivel 3**

***Modos de falla de la contención:***

- Falla antes del daño al núcleo
- Falla durante la ruptura de la vasija
- Falla de aislamiento/ Fuga pre-existente
- Ruptura tardía

- Fuga tardía, sin ruptura
- Sin falla

***Categorías de Liberación Término Fuente:***

- Vía de escape de productos de fisión
- Del combustible o de las barras de combustible
- A través del sistema primario de la contención
- Desde la contención hacia la atmósfera

***Factores que determinan la importancia de Radionúclidos liberados***

- Inventario total del núcleo
  - Productos de fisión
  - Experiencia operativa
  - Vida media
  - Productos de decaimiento
- Factores de reducción de dosis
- Propiedades físicas y químicas
  - Naturaleza de radioactividad (Alfa, beta, gamma)
  - Volatilidad
- Factores de transporte atmosférico
- Impacto biológico
  - Vida media biológica
  - Efectos específicos en órganos
  - Consumo

**2.5. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS**

La gama completa de cálculos llevados a cabo en el marco de un Nivel 3 reduce la brecha entre la ingeniería, las operaciones asociadas con una instalación nuclear y los riesgos potenciales que la instalación plantea al público. El análisis de consecuencias proporciona el enlace final en esta cadena de cálculos y tiene por objeto evaluar el efecto de las liberaciones accidentales de radionúclidos a la atmósfera sobre la población circundante y el medio ambiente.

Por consiguiente, el modelado de las consecuencias puede definirse como un conjunto de cálculos realistas de los rangos (probabilidades de ocurrencia y magnitudes) de posibles impactos adversos que se derivarían de la dosis recibida por los seres humanos debido a una liberación accidental de radionúclidos.

*Liberación desde la instalación*



*Transporte hacia el público*



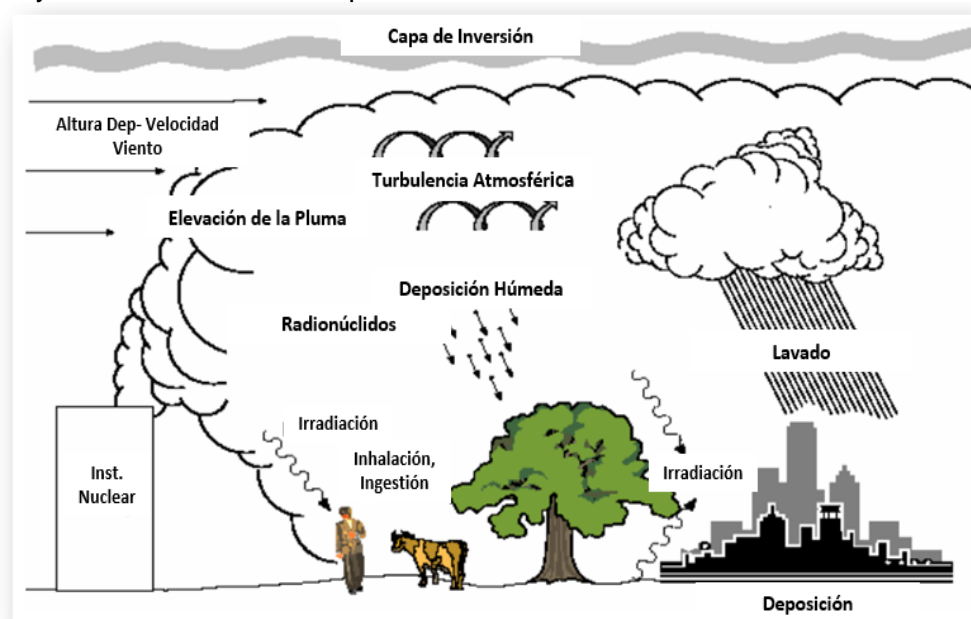
### *Efectos de la liberación transportada hacia el público*

Estos efectos adversos, comúnmente denominados “riesgos públicos”, incluyen (1) muertes tempranas; (2) muertes latentes por cáncer; (3) lesiones tempranas; (4) cánceres no mortales.

Además, pueden producirse impactos adversos debido a la contaminación de la propiedad, la tierra y las aguas superficiales. Los análisis de consecuencias pueden incluir evaluaciones del impacto económico de las estrategias de mitigación, como la reubicación de la población, la descontaminación de suelo y estructuras y la prohibición de los alimentos. El modelado de consecuencias proporciona los medios para relacionar estos riesgos con las características de la liberación radiactiva.

Un análisis de Nivel 3 incorpora información incluyendo demografía, planes de emergencia, propiedades físicas de radioisótopos, meteorología, dispersión atmosférica y transporte, tamaño de estructuras cercanas, protección radiológica y otras disciplinas [4].

En la Figura 2 se ilustran los procesos básicos que ocurren después de una liberación y las vías consideradas para el cálculo de dosis.



**Figura 2 Procesos básicos que ocurren después una liberación y vías consideradas para cálculo de dosis**

Fuente: Nuclear Regulatory Research

### **2.5.1. CÓDIGOS UTILIZADOS PARA DESARROLLAR UN ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS [2,3]**

El Registro Central del DOE, contiene una cantidad de códigos informáticos que cumplen con los requisitos de garantía de calidad de software. Los tres códigos enumerados a continuación están aprobados para su uso en dispersión atmosférica y cálculos radiológicos de las consecuencias para respaldar el análisis de seguridad.

- Sistema de Software de dosimetría de radiación ambiental generalizada (GENNII) desarrollado y actualizado por el *Pacific Northwest National Laboratory*.
- Códigos de Salud Física HotSpot, desarrollado y actualizado por el *Lawrence Livermore National Laboratory*.
- Sistema de Códigos para Análisis de Consecuencias MELCOR2, desarrollado por la NRC y actualizado por el *Sandia National Laboratory*.

Todos estos códigos emplean un modelo de dispersión Gaussiano en estado estacionario y, por lo tanto, están sujetos a limitaciones similares.

Esta clase de códigos no modelan la dispersión cerca de la fuente a menos de 100 m donde la influencia de las estructuras u otros obstáculos aún es significativa. La dispersión influenciada por varias instalaciones dentro de los 100 m debe ser modelada con cuidado, como también aquellas más allá de 10-15 millas donde las condiciones meteorológicas son muy diferentes de las de la fuente.

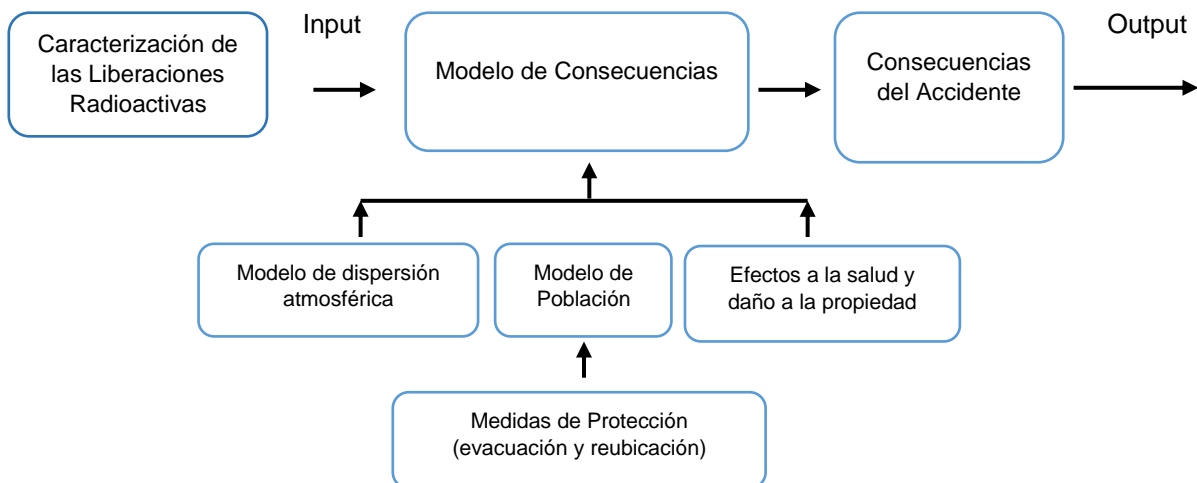
El interés en los Análisis de Consecuencias ha aumentado debido a:

Investigaciones en seguridad.

Extensión de licencias para reactores existentes.

Certificación y licenciamiento de nuevos reactores.

En la Figura 3 se ilustran los modelos utilizados por los códigos computacionales para el cálculo de consecuencias.



**Figura 3 Modelo utilizado por los códigos computacionales para Análisis de Consecuencias**

## 2.6. DOCUMENTO DE INFORMACIÓN TÉCNICA 14844<sup>[5]</sup>: POSTULACIÓN DE UN ACCIDENTE MAYOR

Un objetivo básico de los criterios es asegurar que el acumulado de dosis de exposición para un gran número de personas como consecuencia de cualquier accidente debe ser bajo en comparación con lo que podría considerarse razonable para la dosis poblacional total. Además, a partir de accidentes de gran potencial de daño altamente improbables, se consideró deseable proporcionar protección contra dosis de exposición excesiva de personas en grandes centros, donde las medidas de protección efectivas pueden no ser factibles. La distancia al centro poblacional se agregó como un requisito para evaluar especificaciones del sitio.

Postulación de un accidente mayor:

En la práctica, después de la identificación sistemática y evaluación de tipos de accidentes posibles en una instalación dada, se postula un accidente nuclear que resultaría en un peligro potencial que no se excedería por cualquier otro accidente considerado creíble durante la vida de la instalación. Tal accidente se ha conocido como “el accidente máximo creíble”.

Para reactores PWR y BWR, por ejemplo, el “máximo accidente creíble” ha sido frecuentemente postulado como pérdida completa de refrigerante debido a la ruptura completa de una tubería principal con expansión consecuente del refrigerante como vapor intermitente, derretimiento del combustible y liberación parcial del inventario de productos de fisión a la atmósfera desde el edificio del reactor. Puede haber otras combinaciones de eventos que podrían liberar importantes cantidades de productos de fisión hacia el medio ambiente, pero en todos los casos, para los eventos descritos anteriormente la probabilidad debe ser excesivamente pequeña y sus consecuencias deben ser menores que las del máximo accidente creíble.

En el análisis de cualquier combinación particular sitio-reactor, una evaluación realista de las consecuencias de todas las creíbles y significativas posibilidades de liberación de productos de fisión se realiza para proporcionar una estimación de cada caso de lo que realmente constituye el accidente “máximo creíble”. Esta estimación o postulado de accidente puede entonces ser evaluado para determinar si cumple o no con los criterios del 10 CFR 100. Como otro beneficio importante, tales análisis sistemáticos de accidentes potenciales a menudo conducen al descubrimiento de formas en que se pueden proporcionar salvaguardias contra accidentes particulares.

Dado que una serie de análisis indicaron que la secuencia: ruptura de la tubería-fundición en un reactor de agua daría como resultado la liberación de productos de fisión, el cual no es probable que sea superado por ningún otro



accidente “creíble”, (por lo tanto, esto fue designado el Mayor Accidente Creíble en estos casos), el resto de esta discusión se refiere a este tipo de reactor y este tipo de accidente.

Los reactores de potencia y prueba actualmente están en funcionamiento o en construcción cerca de zonas habitadas, de conformidad con las licencias emitidas por la Comisión de Energía Atómica, encerrados dentro de vasijas de contención de algún tipo. Esta barrera exterior a la liberación de productos de fisión a la atmósfera tiene dentro de su recinto todo o una parte sustancial de los sistemas de tuberías de refrigerante primario que representan una barrera interna. El revestimiento del combustible proporciona una barrera adicional que actúa como una “lata” de retención para el material fisionable y los productos de fisión formados. Por lo tanto, la liberación bruta de productos de fisión a la atmósfera solo puede ocurrir después de la violación de las dos barreras internas, el revestimiento del combustible y el sistema primario, y luego de las barreras externas: el edificio de contención.

La forma en que una liberación bruta de productos de fisión en la vasija del reactor puede darse debe seguir uno de los dos procesos siguientes:

- 1) a través de salidas de energía nuclear que causan presión en el refrigerante confinado, lo suficiente para romper la tubería del refrigerante o
- 2) por una falla mecánica de la tubería o barrera de retención de presión.

A partir de estas consideraciones y análisis detallados de las características de seguridad inherente e ingeniería de prevención de accidentes, la posibilidad de un accidente mayor en el reactor es extremadamente baja, sin embargo, la posibilidad de un accidente serio no puede ser completamente descartada y las consecuencias deben ser consideradas.

Si una liberación mayor de productos de fisión al ambiente ocurriera, las dosis potenciales de exposición a personas fuera del sitio son extremadamente difíciles de determinar con exactitud debido a todos los complejos parámetros involucrados.

La cantidad de cada tipo de material radiactivo presente en el reactor puede ser fácilmente determinado como función del nivel de potencia histórico pero la cantidad de este material que podría ser liberado como resultado de un accidente es impredecible.

En accidentes de tipo “Máximo creíble”, usualmente se asume que los materiales radiactivos, serán dispersados en el refrigerante a través de la fundición o ruptura de los elementos combustibles y entonces encontrarán un paso hacia fuera de la contención a través de grietas en el sistema de refrigeración. En el agrietamiento, la expansión a un gran volumen y baja presión en la vasija de contención resultaría en vapor, en adición a productos de fisión gaseosos y la producción de vapores, así como aerosoles sólidos y líquidos de un amplio rango



de tamaños. Algunos materiales expulsados pueden conservadoramente entrar en contacto con el aire y entonces incrementar los volátiles y fracciones de partículas finas. Al mismo tiempo, una cierta cantidad de productos de fisión volátiles serán removidos por fenómenos como adsorción, deposición, y condensación de vapor dentro del edificio del reactor o la estructura de la contención.

Para personas cercanas al edificio del reactor, el inventario radiactivo confinado representa una fuente de decaimiento directa de radiación gamma, la cual, es atenuada por varios factores como protecciones estructurales, distancia y barreras por la topografía. Para estos y más puntos distantes, el transporte por aire de materiales radiactivos que fugaron desde la contención es la mayor consideración radiológica. Para transporte por aire, factores como la naturaleza física de una fuga de material desde la vasija de contención, altura de liberación, deposición de partículas a distancia, dirección del viento, velocidad y variabilidad y gradientes de temperatura del aire, adquieren importancia en determinar magnitudes de peligros potenciales. Los factores meteorológicos serán una función de la región en donde el reactor está localizado, también la hora del día y estación.

Finalmente, cuando las estimaciones han sido hechas de una concentración de radiactividad como resultado de puntos distantes a partir del “accidente máximo creíble”, sigue resultando un problema difícil traducirlas en dosis para cuerpo completo o a tiroides de personas en estos puntos. Para dosis internas, se asumen como resultantes de la velocidad de inhalación, porcentaje de retención en el cuerpo y dosis acumulativas para órganos internos resultado de materiales retenidos.

Es por la complejidad de determinación de estos parámetros técnicos que los valores del área de exclusión, zona de baja población y la distancia al centro poblacional deben ser determinados.

Las suposiciones fundamentales en este documento una vez que las distancias son calculadas con estimaciones del grado de conservadurismo representado en cada caso son como siguen:

1. La probabilidad sigue siendo baja para un accidente donde cantidades significativas de productos de fisión son liberadas dentro del sistema primario de enfriamiento y mucho más baja aún para accidentes en los que se liberen cantidades significativas de radiactividad desde el sistema primario dentro del edificio del reactor.
2. Se asume para un BWR que un “Accidente Máximo Creíble” liberará dentro del edificio del reactor el 100% de gases nobles, 50% de halógenos y 1% de los sólidos en el inventario total de actividad de los productos de fisión. Esta liberación representa aproximadamente el 15% de actividad de productos de fisión total.
3. 50 % de los yodos en la vasija de contención se asumen principalmente disponibles para liberarse a la atmósfera. El 50% remanente de los I se asume es absorbido dentro de superficies internas del edificio del reactor

o adherirse a los componentes internos. El lavado de productos de fisión y las redes de filtrado pueden proveer factores de reducción adicionales de 10-1000.

**Aun si el accidente máximo creíble ocurriera y la contención externa quedara intacta, las dosis de exposición resultantes serían probablemente muchas veces más bajas que las calculadas.**

Por otro lado, hay potenciales y concebibles condiciones de difusión atmosférica y de inventario inicial liberado que pueden resultar en grandes liberaciones de productos de fisión de las que se asume sean liberadas en el accidente máximo creíble y las consecuencias pueden ser aún más peligrosas.

## 2.7. TÉRMINO FUENTE

La definición de categoría de liberación consiste típicamente en los siguientes parámetros:

- a) Magnitud de la fracción de liberación del término fuente para grupos de radionúclidos
- b) Término fuente relacionado con la fracción de tiempo (tiempo de liberación y duración de la liberación)
- c) Tiempo de advertencia antes del inicio de la liberación
- d) Energía de liberación
- e) Altura de la liberación.

La categoría de liberación de una secuencia, como función del tiempo de liberación de los productos de fisión (PF), puede ser Temprana, Intermedia o Tardía, como se indica en la Tabla 1. Para determinar esa clasificación se toma como referencia lo siguiente:

La liberación del Cs-I

El momento en el que se presenta la primera condición operativa para declaración de emergencia general de acuerdo con los Niveles de Acción de Emergencia (NAEs) de la CLV y los Procedimientos de Operación de Emergencia (OEs), a saber:

- ✓ Al requerirse la despresurización de emergencia al reactor
- ✓ Al entrar a enfriamiento por vapor
- ✓ Por límite de la capacidad térmica de supresión
- ✓ Al tener una concentración molar de 5.5% de H<sub>2</sub> y 4.5% de O<sub>2</sub> en la contención primaria
- ✓ Al tener una concentración molar de 10% en H<sub>2</sub> en la contención primaria.

<b>Temprana (6 h)</b>	Si la liberación se encuentra dentro de las primeras 6 h después de haber alcanzado algún Nivel de Acción de Emergencia
<b>Intermedia (6-24 h)</b>	Si la liberación se encuentra dentro un período de tiempo comprendido entre las 6 horas y las 24 horas después de haber alcanzado algún Nivel de Acción de Emergencia
<b>Tardía (&gt;24 h)</b>	Si la liberación se realiza en un tiempo mayor a las 24 h después de haber alcanzado algún Nivel de Acción de Emergencia

**Tabla 1 Criterios por tiempo de liberación de Productos de Fisión.**

\*Basados en los criterios empleados por el NUREG/CR-6094 (*Calculations in Support of a Potential Definition of Large Release*) para acciones de protección de emergencias.

La categoría de liberación de una secuencia puede ser, como función de la magnitud de liberación de los PF, Alta, Media o Baja. Para determinar esa clasificación se toma como referencia la fracción del inventario inicial de Cs-I liberado al exterior de la contención primaria; ya sea que los PF pasen por la contención o sean liberados directamente de la vasija.

<b>Alta</b>	Si la liberación de Cs- I es superior al 10% del inventario inicial existente en el núcleo
<b>Media</b>	Si la liberación de Cs-I es superior al 1% e inferior al 10% de inventario inicial existente en el núcleo
<b>Baja</b>	Si la liberación de Cs-I es inferior al 1% del inventario inicial existe en el núcleo

**Tabla 2 Criterios por magnitud de liberación de PF**

**Fuente: IIE, Actualización del Examen Individual de Planta Nivel 2 de la CNLV U-1**

**Secuencias que más contribuyen a la frecuencia (hasta con un 90% de la frecuencia total):**

<b>Categoría de Liberación</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Secuencias</b>	<b>Características de la liberación</b>	<b>Características del término fuente</b>
<b>Alta/Temprana</b>	25.4	Iniciadas por transitorios con éxito del SCRAM, pérdida de potencia eléctrica	Falla en el pozo seco por calentamiento de la contención después de una expulsión de fundido a alta presión	Más del 10% de Cs-I liberado en fase de vapor en un tiempo menor o igual que 6 h a partir de la primera condición que requiere declaración de emergencia general.
	5.13	externa con falla de los generadores diésel, sin inyección o con pérdida de ésta antes de la falla	Liberación de Productos de Fisión desde la vasija, derivando la contención, con motivo de la reducción de presión del sistema primario con métodos alternos (MSLs, MSIVs)	

	6.52	de la contención.	Falla en el pozo seco por calentamiento de la contención después de una expulsión de fundido a alta presión y derrame de líquido por la localización de la falla.	
<b>Media/Intermedia</b>	13.8	Iniciada por una pérdida de potencia eléctrica externa con la falla de generadores diésel y la falla del HPCS, se despresuriza el reactor de emergencia para inyectar con los sistemas de baja presión.	Liberación de Productos de Fisión desde la vasija, derivando la contención, con motivo del venteo del reactor por inundación de la contención primaria.	Entre 1% y 10% de Cs-I liberado en fase de vapor en un tiempo entre 6 y 24 h a partir de la primera condición que requiere declaración de emergencia general.
<b>Baja/ Intermedia</b>	4.8			Menos de 1% de Cs-I liberado en fase de vapor en un tiempo entre 6 y 24 h a partir de la primera condición que requiere declaración de emergencia general.
<b>Alta/Tardía</b>	8.5	Secuencias en las cuales la integridad de la contención se ve amenazada en el largo plazo, los sistemas de remoción de calor residual están indisponibles de modo que la contención se presuriza hasta alcanzar condiciones de venteo o falla estructural en la alberca de supresión.	Falla estructural en la alberca de supresión con derrame de agua conteniendo Productos de Fisión	Más de 10% de Cs-I liberado en fase líquida en un tiempo mayor que 24 h a partir de la primera condición que requiere declaración de emergencia general
<b>Media/Intermedia</b>	0.39		Venteo del pozo húmedo con revolatilización de productos de fisión	Entre 1% y 10% de Cs-I liberado en fase de vapor entre 6 y 24 h a partir de la primera condición que requiere declaración de emergencia general.
<b>Alta/Tardía</b>	1		Venteo temprano de la contención por explosión de vapor in-vessel	Se estima que la liberación puede ser mayor del 10% de Cs-I en un tiempo menor igual que 6 h

**Tabla 3 Secuencias que más contribuyen a la frecuencia de liberación**

**Fuente: IIE, Actualización del Examen Individual de Planta Nivel 2 de la CNLV U-1**

El término fuente es tradicionalmente especificado por un conjunto de liberaciones fraccionadas de un inventario inicial del núcleo.

## 2.8. LERF [6]

De acuerdo con el documento ASME/ANS RA-S-2009 la LERF se define como el número esperado de liberaciones grandes tempranas (LER) por unidad de tiempo. De acuerdo con la misma referencia, la liberación tipo LER se define como la liberación vía aérea (*airborne*) rápida y no mitigada de productos de fisión de la contención al ambiente, que tengan el potencial de efectos tempranos a la salud y que ocurran antes de la implementación efectiva de acciones de protección y respuesta a emergencias fuera del sitio.

El Valor de 10% de Cs-I como criterio para determinar si una secuencia se clasifica en el grupo más alto se debe a la selección de secuencias importantes de la carta genérica.

Se toma la fracción del inventario inicial de Cs-I en el núcleo como referencia para la clasificación por magnitud por las siguientes razones:

Entre los PF hay otros elementos con radioisótopos de interés en el corto plazo, tales como los gases nobles, Xe y Kr, el Ba y el Sr. El Ba y el Sr no son los mejores candidatos para el índice de severidad empleados por tener una volatilidad inferior al I y al Cs, lo que implica una tendencia a ser liberados más tarde y en menores cantidades que el Cs-I. Con respecto al Xe y al Kr, esos gases tienen la mayor facilidad de entre todos los PF para liberarse y transportarse y muy poca para ser retenidos. Por lo anterior es común que se libere el 100% del inventario inicial de esos gases en el núcleo en la gran mayoría de las secuencias y no se constituyen como buenos indicadores que ayuden a distinguir entre algunas secuencias con consecuencias potencialmente mayores que otras.

El estado de agregación de los gases nobles y su comportamiento de baja reactividad química los hace menos susceptibles al ingresar a los seres vivos por mecanismos distintos a la inhalación, como lo puede ser por ingesta y vía cutánea, mecanismos a los que es más susceptible el Cs-I.

El yodo es un elemento importante desde el punto de vista radiológico, la actividad del yodo es una de las más importantes entre los PF durante las primeras horas y decenas de horas, a partir del apagado del núcleo. El yodo tiene varios isótopos de vida media corta: I-131 (8 días), I-132 (2.3 h), con una vida media "efectiva" de 3.3 días, I-133 (20.8 h), I-134 (0.9 h) y el I-135 (6.6 h).

### **CHERNOBYL (EJEMPLO DE UNA LIBERACIÓN ACCIDENTAL GRANDE)<sup>[3]</sup>**

- Fase intensa inicial de liberación durante fundición de núcleo
  - Fragmentos de combustible, partículas de aerosoles, gases y vapores

- Liberación de alta energía elevando la pluma caliente hacia la atmósfera
- La liberación continuó en el nivel inferior con un pico secundario durante 10 días
- Más de la mitad del inventario del núcleo de yodo, un tercio de cesio y telurio fue liberado
- 3.5% de combustible liberado en liberación tardía debido a la oxidación de residuos del núcleo
  - Elementos de baja volatilidad como cerio, zirconio y actínidos principalmente fueron retenidos en los fragmentos de combustible
- Rutenio y molibdeno liberados en fase tardía debido a la oxidación de formas volátiles

## 2.9. CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS

Las dosis radiológicas pueden surgir de la exposición a nubes de material radiactivo y las consecuencias a partir de la nube y de la exposición a radiación inmediata (directa). Las vías de exposición incluyen:

- Inhalación de material radiactivo (partículas y gases) proveniente de una nube
- Inhalación de partículas en el suelo, que han sido resuspendidas por el tráfico o por el viento
- Ingestión de productos alimenticios y agua contaminada por la lluvia radiactiva de la nube
- Radiación gamma proveniente de la pluma (*cloudshine*)
- Radiación gamma de partículas depositadas en el suelo después de la lluvia radiactiva (*groundshine*)
- Contaminación de la piel por lluvia radiactiva y
- Radiación puntual (directa) de neutrones y radiación gamma

## 2.10. EFECTOS DE LA RADIACIÓN

La radiación daña el cuerpo al depositar su energía (principalmente a través de la ionización) en los órganos y tejidos. Debido a que la radiación alfa puede ser detenida por el epitelio del cuerpo (capa externa de células muertas de la piel), no presenta ningún riesgo externo para el cuerpo; más bien, su peligro es a través de la inhalación e ingestión. La radiación beta puede penetrar la piel (apenas) para causar algún daño; radiación beta también puede dañar los ojos. Al igual que la radiación alfa.

Radiación gamma y neutrones, por otro lado, causan daños a medida que penetran en el cuerpo directamente de una fuente externa; eso es, el material que

emite la radiación gamma. La contaminación de la piel por la precipitación causa daño al tejido principalmente por radiación beta. Ambas exposiciones a corto y largo plazo son importantes: radiación externa (*cloudshine*, *groundshine*, contaminación de la piel o radiación directa) generalmente a corto plazo, mientras que la radiación interna (por inhalación e ingestión) proporciona un efecto a largo plazo, dosis (comprometida). Una dosis a largo plazo también puede surgir de la exposición continua a radiación externa, como en un lugar de trabajo. Si se inhala o ingiere una partícula radiactiva, causará daños siempre que permanece en el cuerpo porque contiene muchos átomos radiactivos que continúan decayendo. Si un órgano o tejido se irradia durante un tiempo prolongado, puede desarrollar cáncer o sufrir otros efectos nocivos [7].

## 2.11. EVALUACIÓN DE DOSIS

Actualmente, la dosis se expresa como una dosis absorbida, es decir, la cantidad de energía depositada en la materia, o como un equivalente de dosis, una medida del daño hecho al tejido. La unidad tradicional de dosis absorbida es el rad y se define como 100 ergs absorbidos en un gramo de material, ligeramente mayor que el rep (roentgen, eg. físico). La unidad más nueva (SI) es el gray (Gy) y se define como un Joule absorbido en un kg de material.

Así  $1\text{Gy}=100\text{ rad}$  Esta definición se aplica a cualquier tipo de radiación absorbida en cualquier tipo de material.

La dosis de mayor interés en el análisis de accidentes es el equivalente de dosis, ya que, ésta es una medida del daño biológico. La cantidad de daño depende del tipo de radiación, así como la cantidad de energía absorbida. El equivalente de dosis, HT a un tejido particular (T) es igual a la dosis absorbida, DT, en ese tejido, multiplicado por un factor de ponderación de radiación, WR.

$$HT = WR * DT$$

Donde WR es una medida de la cantidad de daño causado por cada tipo de radiación. Si más de un tipo de radiación afecta al tejido, HT se calcula, sumando todos los tipos de radiación.

La unidad tradicional para el equivalente de dosis es el rem. La nueva unidad (SI) es el sievert (Sv). La relación entre ellos es la misma que entre gray y rad.

$$1\text{ Sv} = 100\text{ rem}$$

La definición de equivalente de dosis no diferencia entre la dosis a corto y a largo plazo, o entre exposición externa e interna. Un término relacionado es el equivalente de dosis comprometida, que es la dosis prevista de exposiciones internas durante la vida restante del individuo, normalmente tomado como 50 años



para adultos (como trabajadores) y 70 años para niños (como población en general); no incluye exposiciones externas. El equivalente de dosis comprometida es por lo tanto un subconjunto del equivalente de dosis. Esto ha llevado a cierta confusión, ya que, ha llevado a algunos trabajadores a usar (incorrectamente) dosis equivalentes exclusivas para radiación externa, aparentemente como un contrapunto al equivalente de dosis comprometida, que se usa exclusivamente para radiación interna.

Un nuevo término, equivalente de dosis total en órganos (TODE), se utiliza ahora para indicar la suma de los factores externos (a corto plazo) a un órgano o tejido (CFR, 1991). Las dosis también se calculan para el cuerpo como un todo.

Esto se hace sumando para todos los órganos el producto de un factor de ponderación del órgano y el equivalente de dosis para ese órgano. Esta suma se llama dosis efectiva (anteriormente, el equivalente total de dosis efectiva (TEDE)-un término todavía utilizado). Los factores de ponderación de los órganos representan la fracción del riesgo total para la salud que resulta de la irradiación uniforme a todo el cuerpo que podría atribuirse a ese tejido u órgano en particular. Estos factores son entre cero y uno; la suma contando todos los órganos y tejidos es uno <sup>[7]</sup>.

## 2.12. RIESGOS PARA LA SALUD

Una vez que se ha calculado la dosis, se pueden determinar los riesgos a la salud, correspondientes. Esto se hace multiplicando la dosis por factores de riesgo estocásticos. Las muertes latentes por cáncer (LCF) son los riesgos para la salud de mayor interés. El término “latente” indica que las muertes por cáncer estimadas se producirían en algún momento en el futuro, dentro de los próximos 50 años para adultos, o los próximos 70 años para población en general que incluye niños.

También se pueden calcular las latentes apariciones de cáncer (fatal y no fatal), efectos genéticos, etc. pero estos últimos no se evalúan normalmente en los análisis de seguridad. Los factores de riesgo estocásticos dependen del tipo de radiación y del órgano considerado.

En el caso de los emisores alfa, como Pu y U, los únicos órganos de importancia para el riesgo de cáncer son los pulmones, el hígado y la superficie ósea.

## 2.13. IMPORTANCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA <sup>[7]</sup>

La mayoría de los términos de fuente radiológica se pueden tratar como neutralmente flotantes. Por neutralmente flotante, se supone que la nube del material liberado tiene aproximadamente la misma densidad que el aire. Esto es normalmente una suposición válida para las emisiones radiactivas que son de



naturaleza gaseosa que contienen rastros de partículas muy finas, aerosoles y gases. A medida que la nube se emite y se mueve a favor del viento, es una práctica común basada en convenciones y datos experimentales de apoyo, para asumir una distribución Gaussiana tanto en la dirección del viento como en la vertical por liberaciones continuas. Para liberaciones continuas, la velocidad media del viento diluye el contaminante, pero la dispersión a favor del viento es despreciable. A medida que la nube se mueve viento abajo, se hace progresivamente más grande debido a los movimientos laterales y difusión vertical, por lo tanto se vuelve menos concentrado. Si la liberación es de corta duración, la velocidad media del viento solo actúa como agente de transporte y la turbulencia en dirección del viento se vuelve más importante.

**PARÁMETROS METEOROLÓGICOS.** Anteriormente se observó que la dispersión de una pluma radiactiva viento abajo puede considerarse un proceso paralelo de transporte y difusión. En términos más simples, el término de transporte es principalmente una función del viento y dirección. La difusión de la pluma se debe en gran parte a la estabilidad atmosférica de la región de transporte.

**VIENTO Y DIRECCIÓN.** El viento predominante es un determinante clave del transporte de la pluma radiactiva. En términos de importancia para los cálculos de análisis de accidentes, el viento es una cantidad vectorial que tiene tanto dirección como magnitud. La velocidad del viento a la altura de la liberación determina tanto la difusión inicial del contaminante como el tiempo de viaje para llegar a un determinado receptor viento abajo. La difusión inicial y el recorrido de la pluma son directamente proporcionales a la velocidad del viento. También es un factor en determinar la magnitud de la estabilidad atmosférica.

Turbulencia atmosférica (es decir, turbulencia mecánica) se genera cuando cantidades de aire adyacentes se mueven a diferentes velocidades o se mueven en diferentes direcciones. Por lo tanto, un cambio en la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, o una variación en la dirección del viento a una altura dada, causa turbulencia mecánica; el efecto puede describirse a través del parámetro de longitud de rugosidad superficial. La turbulencia mecánica también se genera cuando el aire interactúa con algún objeto fijo, como el suelo y los obstáculos como la vegetación y estructuras o con un edificio, descrito por efectos aerodinámicos tales como la estela y cavidad. La dirección horizontal del viento a la altura de la liberación determina la dirección del transporte. La dirección del viento, es el promedio de una serie de mediciones “instantáneas” de la dirección del viento. Por convención la dirección del viento está desfasada 180° con la dirección del transporte. La turbulencia atmosférica está directamente relacionada con la variabilidad de la dirección del viento.

**PERFILES DE TEMPERATURA.** Cuando una pluma es desplazada en el plano vertical se expandirá (si aumenta) o se contraerá (si se hunde) para ajustar su presión a la de su entorno. La expansión o contracción va acompañada de un

cambio de temperatura adiabático. A medida que se eleva una pluma, se enfría. El aire circundante es más cálido, la pluma será más pesada que sus alrededores y se hundirá hacia su posición original. Por otro lado, si el aire circundante es más frío, la pluma será más ligera y continuará moviéndose hacia arriba.

**CLASES DE ESTABILIDAD ATMÓSFERICA.** La velocidad a la que la turbulencia difunde el material depende de la estabilidad de la atmósfera. Se han definido 7 clases de estabilidad (es decir, clases Pasquill-Gifford-Turner).

A: Extremadamente inestable (fuertemente superadiabático). Normalmente ocurre durante condiciones de sol brillante con velocidad del viento relativamente baja (< 3 m/s).

B: Moderadamente inestable (moderado superadiabático). Normalmente ocurre durante condiciones con sol brillante y velocidades de viento en el rango de 3 a 5 m/s, a la luz tenue del sol con velocidades de < 2 m/s

C: Ligeramente inestable (ligeramente superadiabática). Normalmente ocurre durante condiciones que varían del sol brillante con velocidades de viento en el rango de 5 a 6 m/s a la luz tenue del sol con velocidad de viento de 2 a 3 m/s.

D: Neutral (adiabático). Normalmente ocurre con sol moderado a tenue, condiciones nubosas y por la noche, con velocidades de viento > 3 m/s. También ocurre con velocidades de viento muy fuertes, ya sea en días soleados o nublados.

E: Ligeramente estable (Ligeramente subadiabático con o sin inversión). Normalmente ocurre por la noche o temprano en la mañana con algo de nubosidad y velocidades del viento de 2 a 5 m/s.

F: Moderadamente estable (Subadiabático moderado con inversión). Normalmente ocurre por la noche o temprano en la mañana con poca nubosidad y velocidades de viento relativamente bajas (< 3 m/s).

G: Extremadamente estable (Fuertemente Subadiabático con inversión). Normalmente ocurre por la noche o por la mañana con velocidad del viento muy ligera a casi nula.

Las condiciones inestables dan como resultado una rápida difusión lateral y vertical de las plumas, mientras que las condiciones estables dan como resultado una difusión lateral y vertical lenta (es decir, plumas estrechas). Lo último conducirá a mayores concentraciones de aire desde las emisiones a nivel del suelo.

### **CONDICIONES DE DISPERSIÓN PARA EL ANÁLISIS DE ACCIDENTES.**

Al calcular las concentraciones de la pluma, y consecuentemente, las consecuencias para el receptor, tanto las condiciones “desfavorable” como la “típica” son de especial interés en el análisis de accidentes. Para el análisis de accidentes,

la consideración del receptor MOI (individuo externo expuesto a la dosis máxima), la meteorología desfavorable debe basarse en los datos del sitio.

El tamaño del conjunto de datos utilizado en las evaluaciones meteorológicas debe ser lo suficientemente grande como para ser representativo de las tendencias meteorológicas a largo plazo, en la mayoría de los sitios. Un conjunto de datos de 5 años es deseable, pero se puede aplicar un conjunto de datos de un año en las circunstancias correctas. El análisis de accidentes puede utilizar generalmente la estabilidad predeterminada y la velocidad del viento combinadas. Tanto la base estadística mediana (es decir, el percentil 50) como las bases del percentil 95 se han aplicado para determinar las dosis del receptor in situ como lo marca el apéndice A del DOE-STD-3009-94 (*Preparation Guide for U.S. Department of Energy Nonreactor Nuclear Facility Documented Safety Analyses*).

La media (es decir, promedio) y la moda (es decir, el pico) podrían aplicarse también.

La progresión del accidente no debe definirse para que el MOI no esté sustancialmente expuesta, es decir, utilizando una tasa de liberación específicamente destinada a exponer al MOI a solo una pequeña fracción del material total liberado, o definir el tiempo y velocidad del viento para que la pluma no haya alcanzado el MOI.

Comienza el periodo de exposición desde el momento en que la pluma alcanza el MOI. Para las emisiones en el suelo, la dosis calculada equivale a la dosis de línea central en el sitio límite. Para liberaciones elevadas, térmicamente flotantes o de chorro, la toma de contacto con la pluma puede ocurrir más allá del límite, que normalmente se encuentra en el punto de toma de contacto de la pluma.

## **MODELO GAUSSIANO**

La elección de un modelo de dispersión depende de factores como la fase de análisis de seguridad, complejidad de la instalación, complejidad de la secuencia del accidente y topografía del sitio y su efecto en condiciones ambientales de transporte. El análisis del accidente es más escrutable y técnicamente defendible durante la revisión independiente, si está basado en el modelo gaussiano [7].

La distribución de Gauss en el plano horizontal y vertical determina el tamaño de la pluma que depende de la estabilidad de la atmósfera y la dispersión de la pluma en las direcciones horizontal y vertical desde el punto de liberación.

Los valores de  $\delta y$  y  $\delta z$  son estimados como una función de la distancia a favor del viento ( $x$ ) y la estabilidad de la atmósfera.

Por lo general, las consecuencias radiológicas se expresan como Dosis Total Efectiva (TED) para el receptor en las condiciones de exposición más altas. Para la mayoría de este tipo de accidentes con emisiones cerca del suelo, esta dosis se

evalúa en la ubicación del trabajador o cerca del límite del sitio. El TED incluye los 50 años de dosis efectiva comprometida. Este cálculo de TED no incluye la dosis de ingestión, de agua contaminada y productos alimenticios. La dosis puede ser calculada como sigue:

$$Dosis = DCF * ST * \frac{X}{Q} * BR$$

**DCF** Factor de conversión de dosis por unidad de dosis consumida (rem/Ci o Sv/Bq)

**ST** Término fuente (Ci o Bq)

**x/Q** Concentración Relativa (s/m<sup>3</sup>)

**BR** Tasa de respiración de un individuo expuesto a la pluma (m<sup>3</sup>/s)

Se hacen las siguientes suposiciones para el uso de un modelo Gaussiano:

La extensión de la pluma tiene una distribución normal en las direcciones horizontal y vertical.

La tasa de emisión de radionúclidos o químicos tóxicos (Q) es constante y continua.

La velocidad y dirección del viento son uniformes; y el reflejo total de la pluma tiene lugar en la superficie del suelo [2].

### **UBICACIÓN A LA CUAL SE CALCULA LA DOSIS.**

Se considera la ubicación del MOI teórico estando en el sitio límite. La ubicación calculada se toma en el punto de exposición máxima, típicamente donde la pluma alcanza el nivel del suelo. Es la práctica y expectativa del DOE que las personas en el sitio, tanto los trabajadores como el público estén protegidos bajo los planes de Respuesta a Emergencias y capacidades de sus sitios.

## **2.14. EMERGENCIA GENERAL**

Según la NRC (Nuclear Regulatory Commission) una Emergencia General se define cuando:

Están en progreso o han ocurrido Eventos que incluyen la actual o inminente degradación substancial o fundido del núcleo con una potencial perdida de la integridad de la contención o acciones hostiles que resultan en una actual pérdida del control físico de la planta.

Se pueden esperar razonablemente liberaciones que excedan los niveles determinados en las normas para las medidas de protección de la Agencia de Protección Ambiental (EPA PAG) exposición fuera del sitio.

Por otro parte el Plan de Emergencia Radiológica Externo define una clase de Emergencia General como:

*Cualquier evento ocurrido o en vías de presentarse que implique una degradación sustancial del núcleo del reactor ya sea real o inminente, o bien, la fusión del mismo con una pérdida de la integridad de la población.*

El propósito de la declaración de emergencia es iniciar predeterminadas acciones de protección para el público, para proporcionar una evaluación continua de la información del titular de la licencia y de las medidas organizativas externas, para iniciar medidas adicionales según lo indicado debido a liberaciones actuales o potenciales, para proporcionar asesoría con las autoridades externas y proporcionar actualizaciones al público a través de las autoridades gubernamentales <sup>[8]</sup>.

## 2.15. ESCALA INES

La Escala internacional de eventos nucleares (INES) y radiológicos se utiliza para comunicar rápida y sistemáticamente al público la importancia de la seguridad de los eventos relacionados con las fuentes de radiación. Abarca un amplio espectro de prácticas, entre ellas el uso industrial como la radiografía, el uso de fuentes de radiación en los hospitales, las actividades en las instalaciones nucleares y el transporte de materiales radiactivos. Al poner los eventos de todas estas prácticas en una perspectiva adecuada, el uso del INES puede facilitar un entendimiento común entre la comunidad técnica, los medios de comunicación y el público.

Inicialmente se aplicó la escala para clasificar los eventos en las centrales nucleares y luego se amplió y adaptó para permitir su aplicación a todas las instalaciones asociadas con la industria nuclear civil. Más recientemente, se ha ampliado y adaptado aún más para satisfacer la creciente necesidad de comunicación de la importancia de todos los acontecimientos relacionados con el transporte, almacenamiento y uso de materiales radiactivos y fuentes de radiación.

Los Eventos se clasifican en la escala en siete niveles, se denominan “accidentes” del Nivel 4-7 e “incidentes” para niveles 1-3. Los eventos sin importancia de seguridad se clasifican como “escala inferior o Nivel 0”.

En orden de severidad los eventos son denominados “anomalía”, “incidente”, “incidente serio”, “accidente con consecuencias locales”, “accidente con consecuencias mayores”, “accidente serio” y “accidente mayor”.

La gravedad de un evento aumenta en aproximadamente un orden de magnitud para cada aumento en el nivel de la escala (escala logarítmica). Los eventos se consideran en términos de su impacto en tres áreas diferentes: impacto en las personas y el medio ambiente; impacto sobre las barreras radiológicas y los controles en las instalaciones y el impacto en la defensa en profundidad.

La comunicación de eventos y sus calificaciones INES no es un sistema formal de información. Del mismo modo, los criterios de la escala no pretenden reemplazar los criterios bien establecidos existentes utilizados para los arreglos formales de emergencia en cualquier país. Corresponde a cada país definir sus propios reglamentos y arreglos para tales asuntos. El objetivo de INES es simplemente ayudar a poner en perspectiva la importancia de la seguridad de los eventos que se van a comunicar.

La calificación de los acontecimientos en términos de su impacto en las personas y el medio ambiente tiene en cuenta el impacto radiológico real sobre los trabajadores, los miembros del público y el medio ambiente. La evaluación se basa en las dosis para las personas o la cantidad de material radiactivo liberado. Cuando se basa en la dosis, también tiene en cuenta el número de personas que reciben una dosis.

Los cuatro niveles más altos de la escala (Niveles 4-7) incluyen una definición en términos de la cantidad de actividad liberada, definiendo su tamaño por su equivalencia radiológica a un número dado de terabecquerelios de  $^{131}\text{I}$ .

La elección de este isótopo es algo arbitraria. La escala se desarrolló originalmente para centrales nucleares y  $^{131}\text{I}$  sería generalmente uno de los isótopos más significativos liberados. La razón de usar la cantidad liberada en lugar de la dosis evaluada es que para estas liberaciones mayores, la dosis real recibida dependerá en gran medida de la acción de protección implementada y de otras condiciones ambientales. Si las acciones de protección tienen éxito, las dosis recibidas no aumentarán en proporción a la cantidad liberada.

Se dan dos métodos para evaluar la importancia radiológica de una liberación, dependiendo del origen de la liberación y, por lo tanto, los supuestos más apropiados para evaluar la equivalencia de las liberaciones. Si hay una liberación atmosférica de una instalación nuclear, tal como un reactor o una instalación de ciclo de combustible, la escala proporciona los factores de conversión para la equivalencia radiológica a  $^{131}\text{I}$  que debe utilizarse. La actividad real del isótopo liberado debe multiplicarse por el factor indicado y luego compararse con los valores dados en la definición de cada nivel. Si se liberan varios isótopos, se debe calcular el valor equivalente para cada uno y luego se suma <sup>[9]</sup>.

Clasificación	Descripción en base a material liberado
<b>INES 4</b>	Un suceso que resulta en una liberación correspondiente a una cantidad de radioactividad equivalente a una liberación del orden de decenas a cientos de terabecquerelios de Yodo $^{131}\text{I}$ $< 500 \text{ TBq I-131}$

<b>INES 5</b>	Un suceso que resulta en una liberación correspondiente a una cantidad de radioactividad equivalente a una liberación del orden de cientos a miles de terabecquerelios de Yodo 131
<b>INES 6</b>	Un suceso que resulta en una liberación correspondiente a una cantidad de radioactividad equivalente a una liberación del orden de miles a decenas de miles de terabecquerelios de Yodo 131
<b>INES 7</b>	Un suceso que resulta en una liberación correspondiente a una cantidad de radioactividad equivalente a una liberación mayor a decenas de miles de terabecquerelios de Yodo 131

**Tabla 4 Clasificación INES en función del material liberado a la atmósfera**

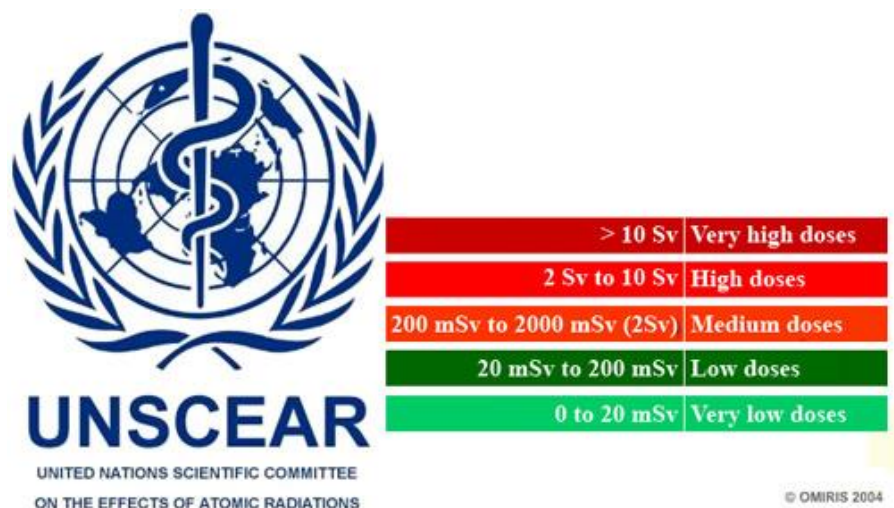
Fuente: [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

## 2.16. CLASIFICACIÓN DE DOSIS (Exposición Aguda)

Una clasificación de dosis para exposiciones agudas. Cuando se trata de la exposición a radiaciones, ¿qué queremos decir con dosis fuertes o débiles? Incluso entre los expertos, la pregunta ha llevado a mucho debate. Para algunos, toda exposición es peligrosa: la dosis más pequeña ya es demasiado fuerte. Para otros, los efectos de la radiactividad no deben sobre estimarse.

El Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de las radiaciones nucleares (UNSCEAR) ha establecido una forma de clasificar los niveles de exposición en función de los umbrales por encima de los cuales se producen los efectos deterministas, es decir, los efectos que sienten todos los individuos que son expuestos por encima de estos umbrales. La clasificación UNSCEAR se aplica sólo a dosis efectivas correspondientes a exposiciones globales agudas, lo que significa, una dosis recibida por todo el cuerpo durante una irradiación corta e intensa. Los efectos deterministas (aparición de signos o síntomas biológicos a corto plazo posteriores a la irradiación) también pueden aparecer con dosis pequeñas administradas a partes específicas del cuerpo: como los testículos (causando esterilidad transitoria o permanente), ovarios (esterilidad permanente), ojos (cataratas) o la piel (eritema, necrosis). Contrario a los efectos estocásticos tales como la aparición con una baja probabilidad de eventuales cánceres o mutaciones hereditarias muchos años después.





**Figura 4 Clasificación de Dosis**

**Fuente: RADIOACTIVITY.EU.COM <sup>[10]</sup>**

Se debe distinguir entre las exposiciones intensas y de corta duración y las exposiciones crónicas y a largo plazo, como, por ejemplo, la exposición a la radioactividad natural. Son los efectos deterministas causados por el primer tipo de exposición los que deben considerarse prioritarios, ya que, las exposiciones severas a altos niveles de radiación pueden poner en peligro la vida. Esta es la razón por la cual la clasificación de UNSCEAR trata principalmente con este tipo de exposición.

Las dosis efectivas por debajo de 200 milisieverts (mSv) se consideran bajas o débiles, y por debajo de 20 mSv se dice que son muy bajas o muy débiles. La radiación absorbida en un contexto médico (excluida la radioterapia), así como aquellos que ocurren de fuentes naturales entran dentro de esta categoría. Las dosis en este rango se caracterizan por la falta de efectos deterministas, es decir, signos biológicos a corto plazo o síntomas posteriores a la radiación.

Tales efectos deterministas aparecen para las dosis efectivas agudas clasificadas como medianas, fuertes y muy fuertes por el UNSCEAR. La absorción de una dosis entre 0.5 y 2 sieverts (Sv) dará lugar a una reacción leve que implica náuseas, astenia y vómitos entre 3 y 6 horas después de la exposición. Entre 4 y 4.5 Sv se encuentra el llamado nivel DL50, que es el punto en el que la exposición será fatal en el 50% de los casos. Los pacientes cuyos cuerpos completos han estado expuestos a dosis de esta magnitud presentarán el Síndrome de Radiación Aguda (ARS), una afección cuya gravedad dependerá de la dosis absorbida, el tiempo de exposición, el tipo de radiación involucrada y la distribución de la radiación a través del cuerpo. El ARS se caracteriza por síntomas hematológicos (daños en



la médula ósea), síntomas digestivos (daños en el tracto gastrointestinal) y síntomas neurológicos en el sistema nervioso central.

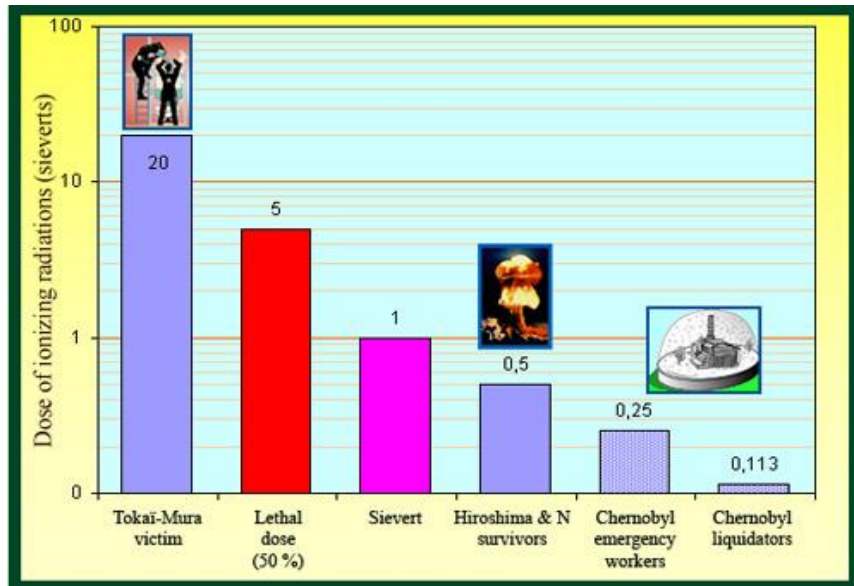


Figura 5 Ejemplo de dosis fuertes

Fuente: RADIOACTIVITY.EU.COM

Los efectos deterministas deben distinguirse de los efectos estocásticos (o probabilísticos) a largo plazo, que se caracterizan por un mayor riesgo de cáncer y mutaciones genéticas. Estos efectos estocásticos están presentes en la región de dosis débil, así como en la región de dosis fuerte, y se ha asumido que todas las exposiciones (sin importar el tamaño de la dosis) conllevan un riesgo de efectos estocásticos. La probabilidad de que se desencadene un cáncer es de alrededor del 5% por sievert. Estas probabilidades se vuelven insignificantes a dosis de una fracción de un sievert <sup>[10]</sup>.

## 2.17. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

La protección radiológica del trabajador se rige por el principio (ALARA) Tan Bajo como sea Razonablemente Posible. El control de la exposición interna a radionúclidos se basa en la limitación de la suma de las dosis actuales y futuras de la ingesta anual (es decir, el equivalente de dosis efectivo comprometido). Si se encuentra que el límite de dosis es excedido para un trabajador, las acciones correctivas son necesarias. Las pautas principales para la exposición anual de un trabajador son 5 rem para el equivalente de dosis efectivo, 50 rem para órganos o tejidos individuales y 15 rem para la lente del ojo. Se utilizan dos tipos de guías derivadas para implementar esto: (ALI) Límite Anual en Ingesta y la Concentración Derivada en Aire (DAC).

Para los cálculos de dosis que respaldan los Análisis de Seguridad, la dosis debe calcularse utilizando la dosis comprometida a 50 años, siguiendo prácticas conservadoras de protección de la salud y radiológicas<sup>[7]</sup>.

### 2.17.1. ACCIONES PROTECTORAS

Medidas que se toman para evitar o reducir una dosis de radiación pronosticada a la población, después de que ha ocurrido una liberación de material radiactivo en la Central.

**Acciones a corto plazo:** incluyen evacuación, resguardo y relocalización de emergencia fuera de la zona de emergencia basada en la dosis estimada, expresada en dosis efectiva equivalente para la exposición del cuerpo humano. persona-rem.

**Acciones a largo plazo:** incluye relocalización tardía y restricciones agrícolas en el suelo usado para cultivo, relocalización y descontaminación del suelo. La disposición de productos agrícolas y la remoción de tierras de cultivo están basados en criterios de contaminación de suelo.

La población cercana a la planta nuclear que está dentro de la zona de planificación de 16 km está expuesta a la radiación. Cuando la población es evacuada fuera del área y los alimentos potencialmente contaminados son removidos de las tiendas, el riesgo de exposición radioactiva a la glándula tiroides es esencialmente eliminada, más allá de las 16 km, el mayor riesgo de exposición es por ingestión de comida contaminada y productos lácteos<sup>[11]</sup>.

### 2.17.2. ZONAS DE PROTECCIÓN (SEGOB, 2014):

Para definir las áreas o zonas alrededor de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) que requieren medidas de protección a la población y cuáles deben ser esas medidas, se atiende la regulación emitida por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

Dicha regulación establece una Zona de Planeación de Emergencias, a su vez dividida en dos:

**Zona Vía Pluma.-** Área con radio de 16 kilómetros, con centro en los reactores de la CNLV. El radio de esta área puede variar de acuerdo con la situación real.

En la Zona Vía Pluma, la principal vía de exposición al material radiactivo para la población se debería a la inhalación proveniente de la nube durante su desplazamiento y su difusión en la atmósfera.

Dentro de esta zona, se encuentra el Área Precautoria, la cual abarca de los 0 a 5 kilómetros de radio alrededor de la CNLV.

Zona Vía Ingestión. - Área con radio de **80 kilómetros**, con centro en los reactores de la CNLV, con posibilidades de ampliarse hasta donde la situación lo requiera.

En la Zona Vía Ingestión, la principal vía de exposición al material radiactivo para la población se debería a la ingestión de aguas superficiales, alimentos contaminados y por el material radiactivo depositado en el suelo.

Ambas zonas se han dividido en sectores geográficos de 22.5 grados cada uno, comenzando por el sector Norte el cual es cortado en su parte media por el Norte geográfico y siguiendo el sentido de las manecillas del reloj, se asignaron convencionalmente las letras de identificación correspondientes a su orientación geográfica, asimismo, en la **Zona Vía Pluma** se consideran tres anillos concéntricos, ubicados a **5, 10 y 16 kilómetros**, con el objetivo de identificar con mayor precisión las actividades de respuesta, así como las acciones de protección <sup>[11]</sup>.

### 2.17.3. PLAN DE EMERGENCIA RADIOLÓGICA EXTERNO (PERE)

El Plan de Emergencia Radiológica Externo, comprende, entre otras cosas, las disposiciones necesarias para:

- Evaluar y proyectar las consecuencias de una emergencia radiológica fuera de las instalaciones de la CNLV
- Activar y aplicar las medidas de protección necesarias para la población
- Vigilar, monitorear y controlar la exposición radiológica de la población, el personal de respuesta y el medio ambiente.
- Proporcionar información oportuna al público.
- Activar los sistemas de comunicaciones de la organización respuesta.
- Controlar y administrar los equipos de operaciones de emergencia.

Como la generalidad de los planes, el Plan de Emergencia Radiológica Externo (PERE) requiere de información suficiente y oportuna para desarrollar las acciones y tomar las decisiones adecuadas.

Las funciones y procedimientos operaciones están definidos y documentados para cada organización participante en el PERE, a efecto de hacer frente a situaciones de emergencia. A estas organizaciones se les ha denominado “Fuerzas de Tarea”.

#### **Principales parámetros para la Toma de Decisiones de la Jefatura de Control del PERE**

- **Parámetros naturales**
- Velocidad y dirección del viento

- Presencia de lluvias y tormentas tropicales
- **Parámetros radiológicos**
- Término fuente
- Tiempo de liberación y arribo de la nube radiactiva
- Pronóstico de dosis a la población
- Niveles de Acciones de Protección
- Límites de Dosis para el Personal de Respuesta
- Clasificación de la emergencia

### **Etapas de Instrumentación del PERE**

- **Etapas de Preparación.**

Realizar todas aquellas acciones previas y necesarias para la preparación y actualización del plan, así como para la organización de respuesta, a fin de mantener vigente y operable, en cualquier momento y circunstancia, la capacidad de respuesta ante una emergencia

- **Etapas de Respuesta.**

Ejecutar de manera oportuna y eficiente, las acciones establecidas y requeridas, para proteger la salud y seguridad de la población potencialmente expuesta durante una emergencia radiológica en la CNLV.

- **Etapas de Recuperación.**

Ejecutar las acciones necesarias para procurar la recuperación del equilibrio ecológico y permitir el regreso seguro de la población que haya sido reubicada temporalmente, como consecuencia de alguna de las acciones de protección adoptadas.

### **ACTIVIDADES DE RESPUESTA DEL PERE**

- Notificación a la Jefatura de Control.
- Evaluación del Accidente.
- Cálculo de Dosis.
- Monitoreo Ambiental.
- Evaluación de Acciones de Protección.
- Información al Público.

- Control de Tránsito Terrestre.
- Control de Tránsito Aéreo.
- Control de Tránsito Marítimo.
- Transporte.
- Evacuación.
- Profilaxis Radiológica.
- Rescate y Salvamento Terrestre.
- Rescate y Salvamento Aéreo.
- Monitoreo, Clasificación y Descontaminación de Evacuados.
- Atención Médica General

### **ACTIVIDADES DE RECUPERACIÓN DEL PERE**

- Evaluación de Daños.
- Información al Público.
- Monitoreo Ambiental.
- Control de Tránsito Aéreo.
- Control de Tránsito Terrestre.
- Seguridad y Vigilancia.
- Atención Médica General.
- Atención Médica Especializada.
- Control de Agua y Alimentos.
- Descontaminación de Equipo, Vehículos y Aeronaves.
- Recuperación de Sectores.
- Control de la Exposición Radiológica del Personal Participante en la recuperación.
- Atención a Damnificados.
- Monitoreo y Descontaminación del Personal de Respuesta.
- Profilaxis Radiológica.
- Transporte.
- Monitoreo del Espectro Radioeléctrico.

## RESPONSABILIDAD

Secretaría de Gobernación, Secretaría de la Defensa Nacional, Armada de México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Secretaría de Salud, Gobierno del Estado de Veracruz, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, Comisión Federal de Electricidad, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Comisión Nacional del Agua, DICONSA y la Policía Federal Preventiva <sup>[11]</sup>.

### 2.17.4. PROCEDIMIENTOS DE EVACUACIÓN

“Desalojar a los habitantes de un lugar para evitarles algún daño”

Factores que determinan la evacuación:

**A) Riesgos:** Frecuentemente son bajos, si son planeados con anticipación y de forma debida, además de ser llevada a cabo de manera eficiente.

**B) Dificultades:** Tráfico, Idioma, Información al público, Resistencia a la evacuación, Problemas étnicos

**C) Costos:** El costo está en función del tipo de población que se trate

Costos más importantes: Productos Agrícolas y Ganaderos

A considerar: Gastos del albergue, alimentación, transporte y reubicación de la población <sup>[12]</sup>.

### 2.18. NRC: 10 CFR 100.11 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE EXCLUSIÓN, ZONA DE BAJA POBLACIÓN Y DISTANCIA A UN CENTRO POBLACIONAL

Una de las aplicaciones del Análisis de Consecuencias, es:

a) Como ayuda para evaluar un sitio propuesto para la instalación de una planta, el solicitante deberá asumir una liberación de productos de fisión desde el núcleo. La tasa de fuga demostrable esperada desde la contención y las condiciones meteorológicas pertinentes al sitio derivarán en un área de exclusión, una zona de baja población y una distancia al centro poblacional más cercano. A efectos de este análisis que establecerá la base para los valores numéricos utilizados, se deberá determinar lo siguiente:

1) Un área de exclusión de tal tamaño que un individuo ubicado en cualquier punto de sus límites durante dos horas inmediatamente después del inicio de la liberación de productos de fisión postulada no recibiría una dosis de radiación para

todo el cuerpo, superior a los 25 rem (0.25 Sv) o una dosis de radiación en exceso de 300 rem (3 Sv) a la tiroides por exposición a yodo.

2) Una zona de baja población de tamaño tal que un individuo localizado en cualquier punto de su límite exterior que este expuesto a la nube radioactiva resultante de una liberación postulada de productos de fisión (durante el período completo de su paso) no recibiría una dosis total de radiación en todo el cuerpo superior a los 25 rem o una dosis total de radiación a la tiroides mayor a 300 rem por exposición a yodo.

3) Una distancia al centro poblacional de al menos una o tres veces la distancia desde el reactor al límite exterior de la zona de baja población. Al aplicar esta guía, los límites del centro poblacional serán determinados al considerar la distribución de la población. Cuando se trata de ciudades muy grandes, puede necesitarse una distancia mayor debido a la consideración de la dosis poblacional integrada total.

b) Para sitios con múltiples reactores debe considerarse lo siguiente:

1) Si los reactores son independientes en la medida en que el accidente en un reactor no desencadene en otro, el tamaño del área de exclusión, la zona de baja población y la distancia al centro poblacional deberán ser cumplidas individualmente para cada reactor.

2) Si los reactores están interconectados en la medida que un accidente en un reactor podría afectar la seguridad de operación de otro, el tamaño del área de exclusión, la zona de baja población y la distancia al centro poblacional deberá basarse sobre la suposición que todos los reactores interconectados emiten liberaciones de productos de fisión simultáneas. Este requerimiento puede ser reducido en relación con el grado de acoplamiento entre reactores, la probabilidad de accidentes concomitantes y la probabilidad de que un individuo no sea expuesto a los efectos de la radiación de liberaciones simultáneas.

3) Se espera que se muestre que la operación simultánea de múltiples reactores en un sitio no dará como resultado liberaciones radiactivas totales mayores a los límites permisibles en las regulaciones aplicables.

Los cálculos descritos en el Documento de Información Técnica 14844 se pueden usar como punto de partida para la consideración de requisitos particulares del sitio que pueden resultar de la evaluación de las características de un reactor particular, su propósito y el método de operación.

1) La liberación de productos de fisión supuesta para estos cálculos debería basarse en un accidente mayor, hipotetizado para el análisis del sitio o postulado a partir de consideraciones de posibles eventos accidentales, que daría lugar a riesgos potenciales no excedidos por aquellos de cualquier accidente considerado creíble. En general, se ha supuesto que tales accidentes dan como resultado una



fusión sustancial del núcleo con la posterior liberación de cantidades apreciables de productos de fisión.

2) La dosis corporal total de 25 rem referida anteriormente corresponde numéricamente a la dosis comprometida, dosis accidental o de emergencia para trabajadores expuestos a radiación, de acuerdo con la NCRP las consideraciones en la determinación de su estado a la exposición a la radiación pueden ser desatendidas. De cualquier forma, ni su uso ni el valor de 300 rem de radiación para la tiroides como se establece en estas guías de criterios del sitio pretenden implicar que estos números constituyen límites aceptables para las dosis de emergencia al público bajo condiciones de accidente. Por el contrario, este valor total de 25 rem para cuerpo completo y el valor de 300 rem para tiroides se han establecido en estas guías como valores de referencia que se pueden usar en la evaluación de sitios de reactores con respecto a accidentes potenciales de muy baja probabilidad de ocurrencia y bajo riesgo de exposición pública a la radiación.

La dosis externa de radiación gamma a las distancias de la zona de exclusión y baja población debido a productos de fisión contenidos en el edificio del reactor fueron determinados considerando que estos productos de fisión son liberados desde el sistema primario hacia la contención <sup>[13]</sup>.

### 3. CÓDIGOS DE SALUD FÍSICA HOTSPOT

HotSpot utiliza el modelo Gaussiano para los cálculos de dispersión atmosférica que es utilizado por la mayoría de las agencias gubernamentales, incluyendo la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Aborda la liberación de cualquier radionúclido o mezcla de radionúclidos (ICRP 30, ICRP 60). Estos códigos son una aproximación de primer orden de los efectos de la radiación asociados con la liberación atmosférica a corto plazo (menos de unas pocas horas) de material radioactivo.

Los Códigos HotSpot son una estimación conservadora (la dosis de radiación estimada suele ser mayor que la real) de los efectos de radiación asociados con la liberación atmosférica de materiales radiactivos. Se crearon para proporcionar al personal de respuesta a emergencias y a los planificadores de Emergencias un conjunto rápido y portátil de herramientas de software para evaluar incidentes relacionados con material radioactivo. El software también se utiliza para el análisis de seguridad de instalaciones que manejan material radioactivo.

La idoneidad de este modelo para realizar estimaciones iniciales de dispersión o el análisis de seguridad de un peor caso, ha sido probada y verificada durante muchos años. Para estimar con mayor precisión los efectos radiológicos en la proximidad del área de liberación, por ejemplo, a 100 metros del punto de emisión, se utilizan términos fuente virtuales para modelar la distribución atmosférica inicial del material después de una liberación.

Cada estudio de caso se ejecuta con todos los parámetros/valores predeterminados establecidos en los valores exactos del estudio de caso establecidos en la documentación de Hotspot. La salida resultante se compara con los resultados documentados para garantizar que los algoritmos y supuestos funcionen correctamente.

#### 3.1. REQUERIMIENTOS/DATOS DE ENTRADA

- **Cantidades Liberadas**

Estimar las fracciones de liberación para cada grupo de radioisótopos para cada categoría de liberación basada en datos genéricos.

Alternativamente estimar cantidades para cada isótopo para cada categoría de liberación basada en datos genéricos

- **Selección Isotópica**  
 Seleccionar todos los isótopos incluidos en el término fuente que puedan resultar en dosis significativas y efectos a la salud resultante de condiciones de accidente.
- **Inventario de Radionúclidos**  
 Identificar el inventario de cada radionúclido (unidades de actividad) en el momento de inicio del accidente. Pueden ser especificados datos de inventario genéricos. Asegurar que los datos de entrada del término fuente incluyan todos los isótopos significativos.
- **Tiempo de Liberación**  
 Estimar la fracción de tiempo de liberación del término fuente (tiempo de liberación y duración) para cada categoría de liberación basada en un análisis genérico.
- **Tiempo de Aviso**  
 Estimar el tiempo de aviso para acciones de protección para cada categoría de liberación basada en un análisis genérico
- **Energía Liberada**  
 Estimar la energía de liberación para cada categoría de liberación basada en análisis genéricos.
- **Agrupación Isotópica**  
 Para liberaciones multi-isotópicas, AGRUPAR los isótopos dentro de pares o clases basadas en características físicas y químicas similares.
- **Tamaño de Partícula**  
 Estimar un solo tamaño de partícula para cada categoría de liberación basada en fuentes reconocidas (NUREG-1150)
- **Altura o localización de la liberación.** Altura efectiva de la pluma liberada, en metros. En la **Figura 6** se observa la ubicación de venteos en la contención primaria de un BWR desde dónde la liberación de radionúclidos es más probable.

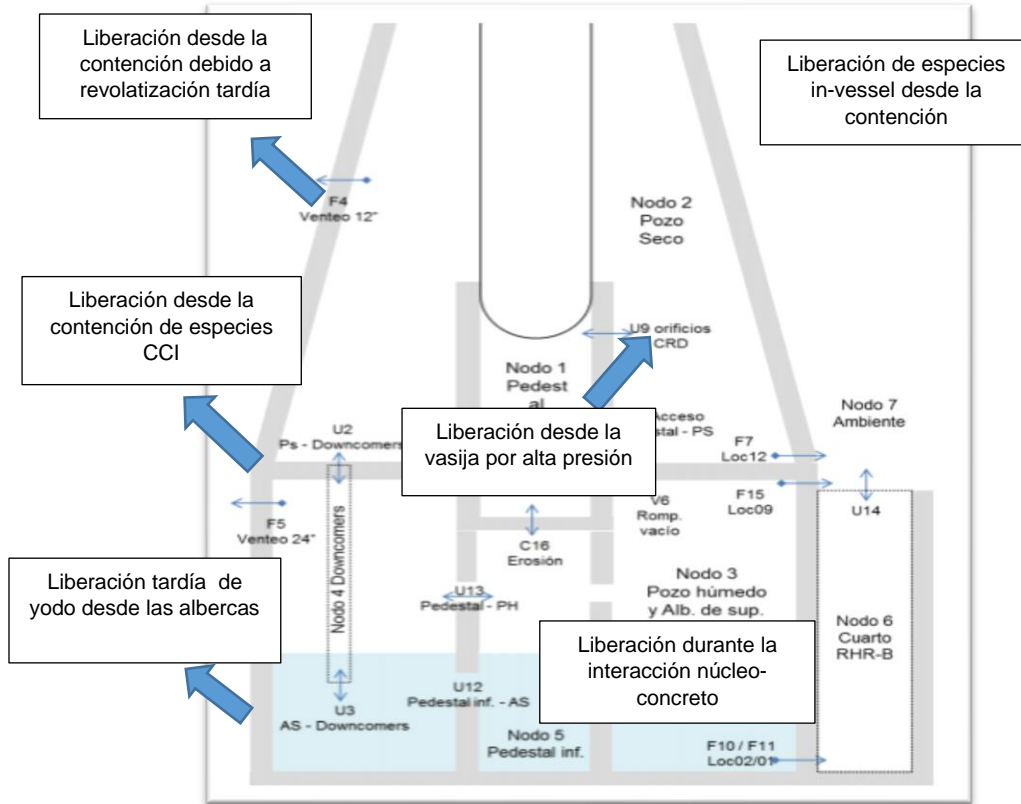


Figura 6 Ubicación de venteos en la contención primaria y los procesos por los que podría darse una liberación de radionúclidos.

### 3.2. ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

- **Velocidad del viento.** Referida a la altura dónde se da la liberación (ALTURA TÍPICA SEGÚN HOTSPOT 10 metros)
- **Estabilidad Atmosférica o información solar de la zona.**
- **Dirección del viento.** Está dada en grados 0= Norte, 90= Este, 180= Sur y 270= Oeste
- Características de la Planta. Elección del terreno y distancia a la que se encuentran los receptores.

Hay numerosos factores que influyen en el cálculo de fatalidades en HotSpot; las características físicas del término fuente, la naturaleza de la respuesta a la

emergencia tomada para mitigar las consecuencias de accidente, demografía del sitio y meteorología.

Tres factores primarios: magnitud de la liberación, tiempo de liberación y la respuesta a emergencias. Junto con la demografía y meteorología del sitio, mezclamos varias combinaciones de valores de las variables representativas, por ejemplo, magnitud baja/liberación temprana/ respuesta a emergencias lenta o alternativamente, gran magnitud/liberación tardía/respuesta rápida como la mencionada en NUREG-1150, para obtener los valores máximos de las consecuencias a corto y largo plazo.

En los siguientes párrafos se describe la simulación en HotSpot de una liberación de 1% del inventario inicial del núcleo (equivalente a un accidente nivel 6 en la escala INES), utilizando información de inventario estimado, datos meteorológicos y de sitio de la Central Nuclear Laguna Verde.

### 3.3. SIMULACIÓN.

1. Inventario Inicial del núcleo con base a los inventarios publicados en (NUREG-CR/6094) para un reactor tipo BWR de 3578 MWt de potencia.
2. Estimar el inventario del núcleo para CNLV mediante una interpolación lineal en función de la potencia térmica de la planta, la cual es de 2317 MWt, posteriormente considerar los factores de equivalencia  $I^{131}$  de INES para obtener el inventario del núcleo en equivalentes de  $I^{131}$ .

Especie	Inventario reactor 3578 MWt (Ci)	Inventario CNLV (Ci)	Factor de Equivalencia	Ci (I131)
<b>Kr-85</b>	8.96E+05	5.80E+05	0.00	0.00E+00
<b>Kr-85m</b>	3.26E+07	2.11E+07	0.00	0.00E+00
<b>Kr-87</b>	5.93E+07	3.84E+07	0.00	0.00E+00
<b>Kr-88</b>	8.00E+07	5.18E+07	0.00	0.00E+00
<b>Xe-133</b>	1.94E+08	1.26E+08	0.00	0.00E+00
<b>Xe-135</b>	4.16E+07	2.69E+07	0.00	0.00E+00
<b>I-131</b>	9.24E+07	5.98E+07	1.00	5.98E+07
<b>Cs-134</b>	1.51E+07	9.78E+06	17.00	1.66E+08
<b>Cs-137</b>	9.05E+06	5.86E+06	40.00	2.34E+08
<b>Te-132</b>	1.34E+07	8.68E+07	0.30	2.60E+06
<b>TOTAL</b>	6.59E+08	4.27E+08	Ci I-131	4.87E+07
			Bq I-131	<b>1.80E+18</b>

Tabla 5 Inventario Radionúclidos en CNLV utilizado en la simulación

### 3. Datos de entrada. Término Fuente.

#### \*Modelo: Plume Rise

Término Fuente	
<b>Radionúclido.</b> Elemento liberado	I-131
<b>Material en Riesgo.</b> Cantidad de material involucrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>1.00% Core – Cs / I / NG (INES 6) Equivalente</b></li> </ul>
<b>Radio de Daño.</b> Cantidad de material (actividad liberada)	1.000
<b>Velocidad de Deposición.</b> Es la relación entre el flujo depositado y la concentración de aire observada cercana a la superficie del suelo	0.30 cm/seg
<b>Fracción Aerotransportada.</b> Fracción de material aerosolizada y liberada a la atmósfera	1.00E+00
<b>Fracción Respirable.</b> Cantidad aerosolizada de material que es respirable. (Partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 1 micra)	1.00E+00
<b>Factor de Fuga.</b> Fracción de Material que pasa a través de algún mecanismo de filtración o confinamiento	1.000
<b>Altura de Liberación Efectiva</b> Altura efectiva de la pluma liberada, en metros	0.0 Caso Conservador= Máxima Exposición 69.9 m + Cálculo de Altura de la pluma considerando 2.39+05 cal/s de Heat Emission = Mínima Exposición
<b>Tiempo Prueba.</b> Tiempo de liberación del radionúclido	15 minutos (Liberación Temprana)
<b>Tiempo de retención.</b> Tiempo en que el radionúclido está contenido previo a su liberación a la atmósfera	0.0 min

Tabla 6 Datos de término fuente

## 3.4. METEOROLOGÍA

Este módulo calcula el percentil 95 de la distribución de dosis para hasta 20 distancias radiales de la línea central en cada uno de los 16 sectores de dirección del viento (dependiente de la dirección), y todos los 16 sectores.

Se debe especificar la velocidad del viento (se asume que es constante a través de la descarga y la dispersión), la clase de estabilidad Pasquill (de acuerdo con la velocidad y dirección del viento y la estabilidad atmosférica en el sitio), parámetros de rugosidad de la superficie, temperatura del suelo, humedad relativa y flujo solar.

En esta zona (Alto Lucero, Veracruz) dominan los vientos Alisios del Hemisferio Norte, dentro de esta zona, la dirección del viento es del NE o del E.

**Vientos reinantes:** Sureste

En la información de Estabilidad Atmosférica se elige introducir Información solar o la estabilidad atmosférica de la zona. Se plantea como uno de los objetivos del proyecto, realizar simulaciones que correspondan a diferentes estabilidades de acuerdo al promedio e información solar de acuerdo al momento del día en el que se propone ocurra la liberación de radionúclidos.

Meteorología	
Velocidad del viento a 10 m de altura	5 m/s
Dirección del Viento	Este
Información Solar	Sol en lo alto del cielo

Tabla 7 Datos de Meteorología

### 3.5. RECEPTORES DE RADIACIÓN

Las distancias desde la fuente se pueden elegir arbitrariamente, pero es importante tomar en cuenta que la Zona Vía Pluma determinada en el **PERE (Plan de Emergencia Radiológica Externa)**, considera tres anillos concéntricos, ubicados a 5, 10 y 16 kilómetros, con el objetivo de identificar con mayor precisión las actividades de respuesta, así como las acciones de protección.

Receptores de Radiación	
Distancias (km)	Desde 0.5 hasta 80 kms
Elevación de los receptores respecto a la fuente	1.50 m
Tasa de Respiración de un individuo	0.000333 m <sup>3</sup> /seg

Tabla 8 Datos Receptores de Radiación

### 3.6. BIBLIOTECA DCF (DOSE CONVERSION FACTORS)

La biblioteca de Radionúclidos de HotSpot incorpora los Federal Guidance Reports Dose Conversion Factors (FGR 11, 12 y 13) para inhalación, sumersión y radiación depositada en superficies (*groundshine*).

El sistema de magnitudes y unidades actualmente en vigor fue establecido por la ICRU (Comisión Internacional para las Unidades y las Medidas de las Radiaciones), el cual establece el sistema de unidades de protección radiológica en su informe número 51, donde se recogen las recomendaciones establecidas en el informe de la Comisión Internacional de Protección Radiológica que recomienda un sistema para limitar las dosis (ICRP-60) del año 1991.



HotSpot utiliza las metodologías de dosimetría de radiación recomendadas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). FGR-11 proporciona coeficientes de dosis en forma de 50 años de dosis integradas equivalentes por inhalación aguda de radionúclidos y se basa en los modelos biocinéticos y dosimétricos de ICRP 30, además seleccionará la clase de absorción más rápida disponible (D, W, Y). FGR-12 proporciona coeficientes de dosis en forma de dosis por unidad de exposición integrada en el tiempo para la exposición externa a radionúclidos. FGR-13 proporciona coeficientes de dosis utilizando el nuevo modelo de pulmón del ICRP-66 y las metodologías de ICRP 60/70 (utiliza los tipos de absorción recomendados por la ICRP 72).

Las DCF (Dosis efectivas equivalentes), están disponibles para estimar los efectos deterministas. Se usa para estimar el impacto radiológico inmediato asociado con altas dosis agudas de radiación (los órganos objetivo aplicables son el pulmón, la pared del intestino delgado, la médula ósea y la tiroides). Se supone un diámetro aerodinámico mediano de actividad de una micra.

Seleccionar la biblioteca HotSpot a utilizar **FGR 11** habilita valores DCF FGR 11/12 (ICRP series 30), **FGR 13** habilita FGR 13/12 valores de DCF (ICRP series 60-70 modelo nuevo). Para obtener el equivalente de dosis a través de los factores de ponderación de tejido.

HotSpot FGR	
FGR-11 ICRP 26/30	FGR-13 ICRP 60/66
Equivalente de Dosis Efectivo Comprometido	Dosis efectiva comprometida
Equivalente de Dosis Comprometido	Equivalente de Dosis Comprometido
Equivalente de Dosis Efectivo Total acumulado	Dosis Efectiva Total Acumulada
Equivalente de Dosis	Equivalente de Dosis
Equivalente de Dosis Efectivo	Dosis efectiva
Factor de Calidad	Factor de ponderación de radiación
Factor de ponderación	Factor de ponderación de tejido
Equivalente de Dosis Efectiva Total	Dosis efectiva total

Tabla 9 HotSpot Opciones FGR

El período de tiempo de exposición para *Groundshine* puede ser modificado en los datos de entrada, además del factor de rugosidad del terreno y el modelo de decaimiento.

Datos de entrada	
Terreno	Standard
Rugosidad del suelo	3 cm
Unidades Radiológicas	SI (Sievert, Gray, Bq)
Biblioteca DCF	FGR 13 Nueva terminología de dosis

<b>Velocidad De Deposición de No-respirable</b> Flujo de deposición o concentración de aire no respirable medida cerca de la superficie del suelo.	8 cm/seg
<b>No respirable</b> Porción no respirable, fracción total de materiales que participan en el evento y que no son respirables y están disponibles para dispersión en la atmósfera.	> 10 µm
<b>Groundshine y Resuspensión</b>	Si se selecciona, todos los datos de dosis incluirán Resuspensión y dosis de inhalación durante lo que dure de la exposición (4 días)
<b>Factor de Resuspensión</b>	Es necesario para estimar el grado de contaminación del aire radiactivo debido a la resuspensión de los contaminantes superficiales.

**Tabla 10 Datos de entrada**

<b>Variables</b>	<b>Aspectos a considerar</b>
<b>Transporte de Material</b>	Fracción de Material que pasa a través de algún mecanismo de filtración o confinamiento, proporción del flujo de deposición y cantidad de aire respirable, estabilidad atmosférica, velocidad de viento, dirección del viento,
<b>Exposición Temprana</b>	Nubosidad, Inhalación, Deposition en la piel, Resuspensión, Radiación depositada en el suelo
<b>Exposición a largo Plazo</b>	Radiación depositada en el suelo, inhalación de contaminación resuspendida, ingestión de agua y comida contaminada, deposición sobre cultivos y absorción en el suelo

**Tabla 11 Aspectos a considerar en algunas variables que intervienen en el análisis**

### 3.7. RESULTADOS HOTSPOT PARA I-131

HotSpot estima las tasas de TEDE (total de dosis comprometida por hora de exposición) que reciben las personas, proveniente de un evento de contaminación.

Los valores de TEDE y Deposition son usados para trazar perímetros de Dosis. Los resultados, incluyen los órganos comprometidos con dosis equivalente que excede los 50 rem (0.5 Sv).

Las simulaciones se realizaron de acuerdo con dos casos de Altura Efectiva:

1. 0 m Caso Conservador = **Máxima Exposición**
2. 69.9 m + Calculate Plume Rise (cálculo de Hotspot) considerando 2.39E+05 cal/s de Heat Emission = **Mínima Exposición**

### 3.7.1. MÁXIMA EXPOSICIÓN

Resultados Dosis Efectiva Total y definición de dosis para Perímetro Interno, Medio y Externo en el caso de Máxima Exposición.

Distancia – Dosis Máxima	0.010 km
TED (Dosis Efectiva Total)	9.81E+03 Sv
Perímetro Interno de Dosis	1.0 Sv
Perímetro Medio de Dosis	0.500 Sv
Perímetro Externo de Dosis	0.250 Sv
Distancia a la que se excede la dosis de Perímetro Interno	2.3 km
Distancia a la que se excede la dosis del Perímetro Medio	3.7 km
Distancia a la que se excede la dosis del Perímetro Externo	5.9 km

Tabla 12 Perímetro de Dosis Máxima Exposición

### 3.7.2. GRÁFICO: ÁREA DE DOSIS MÁXIMA

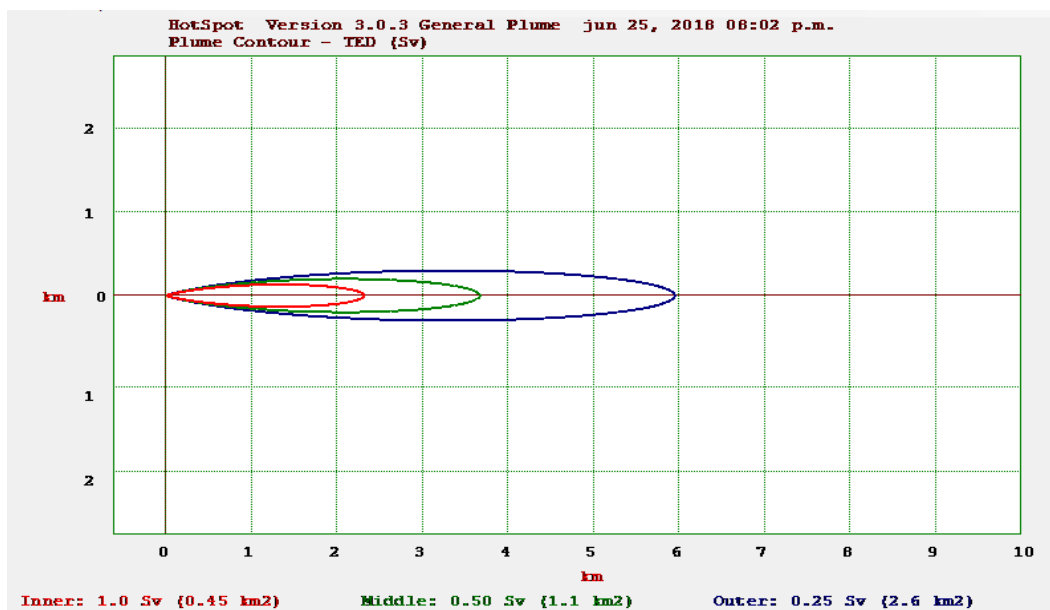


Gráfico 1 Área de Dosis Máxima

En el gráfico anterior se observan los radios alcanzados por las dosis fijadas para perímetro interno (1.0 Sv), medio (0.5 Sv) y externo (0.25 Sv). Las cuales tienen el siguiente alcance a partir de la simulación de una exposición máxima: **1.0 Sv (0.45 km<sup>2</sup>)**    **0.50 Sv (1.1 km<sup>2</sup>)**    **0.250 Sv (2.6 km<sup>2</sup>)**

Por otro lado, en la Tabla 13 se muestran los resultados para TED, Concentración en Aire, Deposition, *Groundshine* (Sv/hr) y tiempo de arribo de la pluma vs Distancia a partir de la fuente.

Línea Central, Altura Efectiva 0 m (Estabilidad D) Máxima Exposición					
Distancia (km)	TEDE (Sv)	Concentración respirable en Aire integrada en el tiempo (Bq-sec/m <sup>3</sup> )	Ground Surface Deposición (kBq/m <sup>2</sup> )	Groundshine tasa de dosis (Sv/hr)	Tiempo de Arribo (hr:min)
1.61	1.80E+00	2.00E+12	6.10E+06	8.00E-03	00:06
2.13	1.10E+00	1.30E+12	3.90E+06	5.10E-03	00:09
3.22	6.10E-01	6.90E+11	2.10E+06	2.70E-03	00:13
4.02	4.40E-01	5.00E+11	1.50E+06	2.00E-03	00:17
5.63	2.70E-01	3.10E+11	9.30E+05	1.20E-03	00:23
8.05	1.70E-01	1.90E+11	5.70E+05	7.50E-04	00:34
11.27	1.10E-01	1.20E+11	3.60E+05	4.80E-04	00:47
16.09	6.70E-02	7.60E+10	2.30E+05	3.00E-04	01:08
20.92	4.80E-02	5.50E+10	1.60E+05	2.20E-04	01:28
32.19	2.80E-02	3.20E+10	9.70E+04	1.30E-04	02:16
40.23	2.20E-02	2.50E+10	7.40E+04	9.80E-05	02:50
50	1.70E-02	1.90E+10	5.70E+04	7.60E-05	03:32
64	1.30E-02	1.40E+10	4.30E+04	5.70E-05	04:31
80	9.70E-03	1.10E+10	3.30E+04	4.40E-05	05:39
85	9.00E-03	1.00E+10	3.10E+04	4.10E-05	06:00

Tabla 13 Resultados Máxima Exposición Línea Central

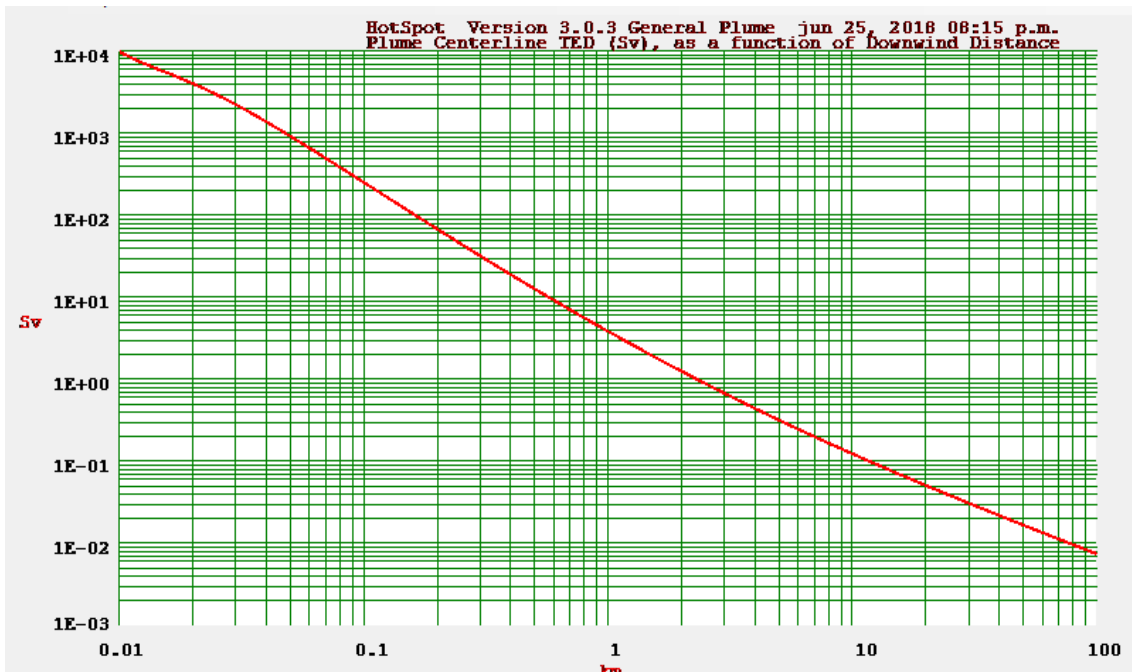


Gráfico 2 Dosis (Sv) vs Distancia (km)

En el caso de Mínima Exposición la Dosis Efectiva Total a 5 km de la fuente es de aproximadamente 500 mSv, mientras que a 10 km es de 100 mSv, aún consideradas dosis media y baja respectivamente, la primera con efectos deterministas a la población por exposición directa.

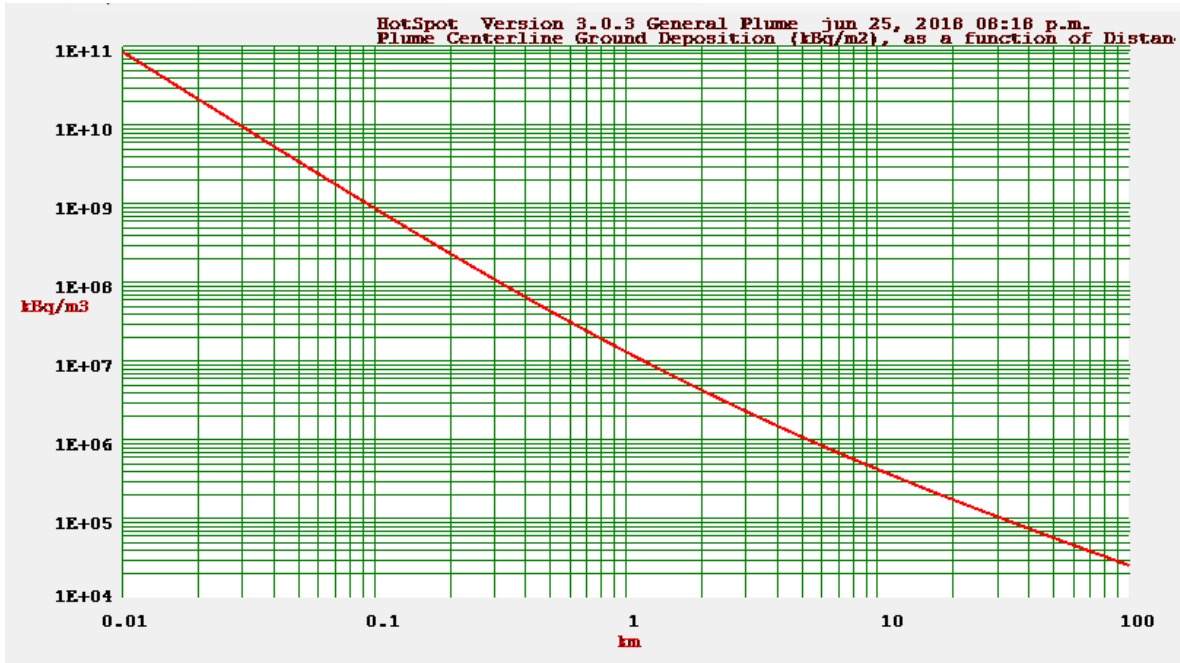


Gráfico 3 Deposition (kBq/m<sup>2</sup>) vs Distancia (km)

Concentraciones depositadas en tierra de hasta 1E+06 KBq/m<sup>2</sup> a 5 km de distancia y de 5E+05 KBq/m<sup>2</sup> a 10 km de la fuente que suponen cantidades de material radiactivo disponibles para inhalación y absorción por exposición indirecta.

En la Tabla 14 Resultados Máxima Exposición se presentan los resultados para dosis por inhalación, resuspensión, *groundshine* y sumersión vs Distancia suponiendo una máxima exposición.

Pluma Línea Central, Altura Efectiva 0 m (Estabilidad D) Máxima Exposición				
Distancia (km)	Inhalación (Sv) (Paso de la Pluma)	Sumersión (Sv) (Paso de la Pluma)	Groundshine (Sv)	Resuspensión (Sv)
2.13	6.93E-01	2.21E-02	2.21E-02	5.35E-03
4.02	2.67E-01	8.51E-03	1.60E-01	2.06E-03
5.63	1.65E-01	5.26E-03	9.90E-02	1.27E-03
8.05	1.01E-01	3.22E-03	6.06E-02	7.78E-04
11.27	6.44E-02	2.06E-03	3.87E-02	4.97E-04
16.09	4.06E-02	1.30E-03	2.44E-02	3.14E-04
20.92	2.93E-02	9.33E-04	1.76E-02	2.26E-04
32.19	1.73E-02	5.52E-04	1.04E-02	1.34E-04
40.23	1.32E-02	4.22E-04	7.95E-03	1.02E-04
50	1.02E-02	3.26E-04	6.13E-03	7.88E-05

<b>64</b>	7.64E-03	2.44E-04	4.59E-03	5.90E-05
<b>80</b>	5.89E-03	1.88E-04	3.54E-03	4.55E-05

**Tabla 14 Resultados Máxima Exposición (Línea Central)**

A 5 km de la fuente, la población puede inhalar hasta 165 mSv, mientras que a 10 km la dosis disponible para inhalación es de apenas 65 mSv. La radiación desde el material depositado en el suelo que puede ser inhalada a 11 km de la fuente es de 40 mSv, dosis consideradas muy bajas sin efectos deterministas.

### 3.7.3. DOSIS EQUIVALENTE TOTAL COMPROMETIDA EN ÓRGANOS (superior a 50 rem/0.5 Sv)

A continuación, se presentan los resultados de dosis Equivalentes Comprometidas para los Órganos que superan los 0.5 Sv a diferentes distancias de la fuente (exposición máxima). Esta dosis supone apariciones latentes de cáncer en la población residente.

#### A 5 KM

Dosis Equivalente Comprometida en Órganos (Sv)					
<b>Piel</b>	[1.6E+00]	<b>Pulmones</b>	[1.1E+00]	<b>Tiroides</b>	[2.0E+00]
<b>Superficie del Hueso</b>	[1.6E+00]	<b>Médula</b>	[9.7E-01]	<b>Hígado</b>	[9.2E-01]

Después de 5 km no se alcanzan los 0.5 Sv de dosis comprometida en órganos.

### 3.7.4. MINIMA EXPOSICIÓN

Resultados Dosis Efectiva Total y definición de dosis para Perímetro Interno, Medio y Externo en el caso de Mínima Exposición.

<b>Distancia – Dosis Máxima</b>	<b>1.7 km</b>
<b>TED (Dosis Efectiva Total)</b>	0.279 Sv
<b>Perímetro Interno de Dosis</b>	1.0 Sv
<b>Perímetro Medio de Dosis</b>	0.5 Sv
<b>Perímetro Externo de Dosis</b>	0.25 Sv
<b>Distancia a la que se excede la dosis de Perímetro Interno</b>	No excedida
<b>Distancia a la que se excede la dosis del Perímetro Medio</b>	No excedida
<b>Distancia a la que se excede la dosis del Perímetro Externo</b>	2.5 km

**Tabla 15 Perímetros de Dosis Mínima Exposición**

En este caso las Dosis correspondientes al perímetro Interno y medio de **1.0 Sv** y **0.5 Sv** no son alcanzados, mientras que los **0.25 Sv** que corresponden al perímetro externo abarca un área de **0.11 km<sup>2</sup>**.

Por otro lado, en la Tabla 16 se muestran los resultados para TED, Concentración en Aire, Deposition, *Groundshine* (Sv/hr) y tiempo de arribo de la pluma vs Distancia a partir de la fuente.

Línea Central, Altura Efectiva 86 m Mínima Exposición (Estabilidad D)					
Distancia (km)	TEDE (Sv)	Concentración respirable en Aire integrada en el tiempo (Bq-sec/m <sup>3</sup> )	Ground Surface Deposition (kBq/m <sup>2</sup> )	Groundshine tasa de dosis (Sv/hr)	Tiempo de Arribo (hr:min)
1.61	2.80E-01	3.20E+11	9.50E+05	1.20E-03	00:03
2.13	2.70E-01	3.10E+11	9.20E+05	1.20E-03	00:05
4.02	1.70E-01	2.00E+11	5.90E+05	7.80E-04	00:09
4.85	1.40E-01	1.60E+11	4.90E+05	6.50E-04	00:11
8.05	8.30E-02	9.50E+10	2.90E+05	3.80E-04	00:19
11.27	5.70E-02	6.50E+10	2.00E+05	2.60E-04	00:27
16.09	3.80E-02	4.40E+10	1.30E+05	1.70E-04	00:38
20.92	2.80E-02	3.20E+10	9.70E+04	1.30E-04	00:50
32.19	1.70E-02	2.00E+10	6.00E+04	7.90E-05	01:17
40.23	1.40E-02	1.60E+10	4.70E+04	6.10E-05	01:37
50	1.10E-02	1.20E+10	3.60E+04	4.80E-05	02:00
64	8.10E-03	9.20E+09	2.80E+04	3.60E-05	02:34
80	6.30E-03	7.20E+09	2.20E+04	2.80E-05	03:13
85	5.90E-03	6.70E+09	2.00E+04	2.70E-05	03:25

Tabla 16 Resultados Mínima Exposición (TED)

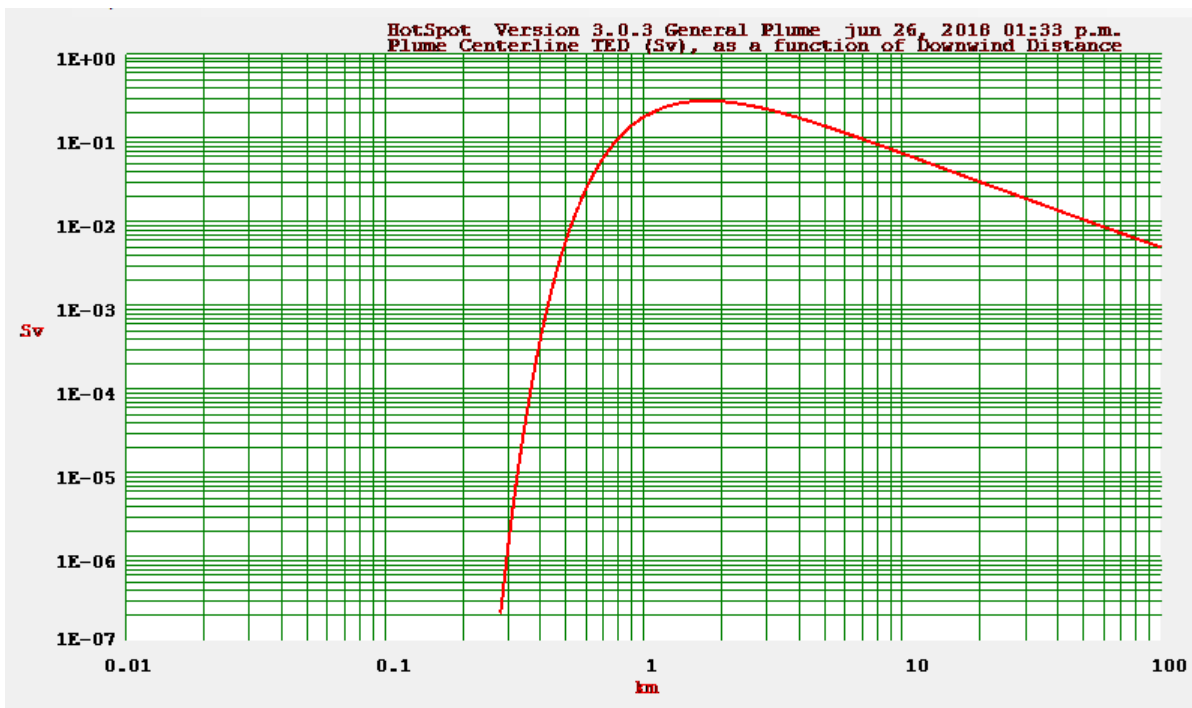


Gráfico 4 Dosis (Sv) vs Distancia (km)



En el caso de Mínima Exposición la Dosis Efectiva Total a 5 km de la fuente es de aproximadamente 100 mSv, mientras que a 10 km es de 70 mSv, consideradas dosis bajas y sin efectos deterministas.

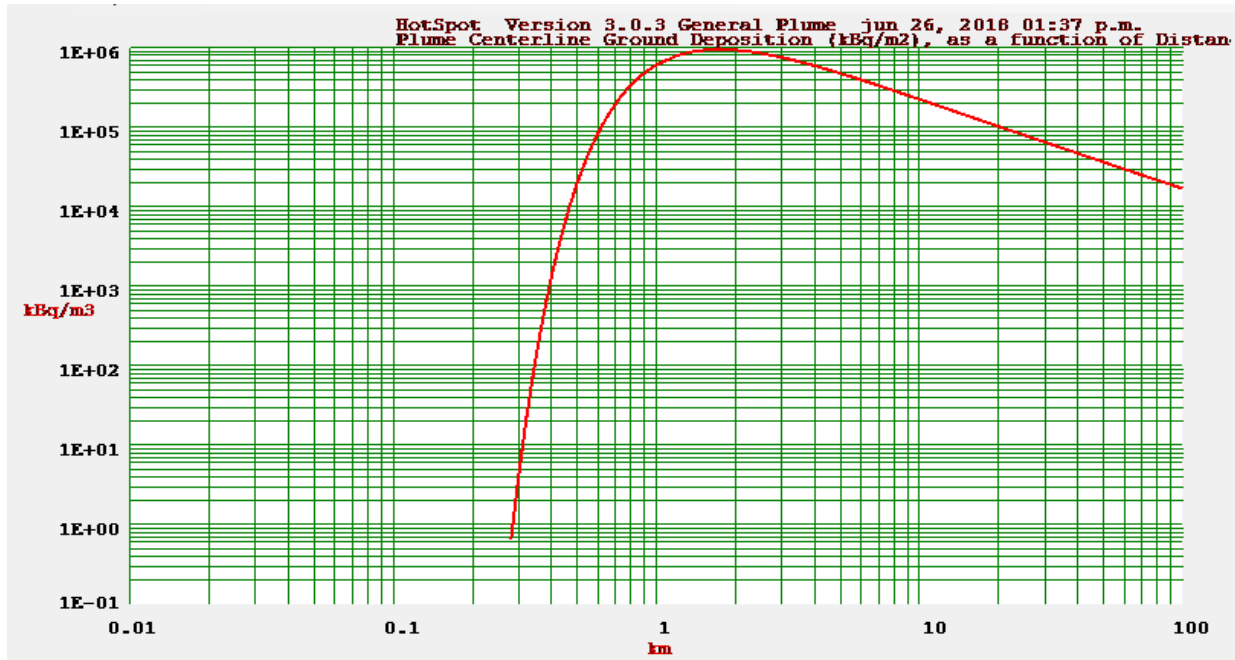


Gráfico 5 Deposición en Suelo (kBq/m<sup>2</sup>) vs Distancia (km)

Concentraciones depositadas en tierra de hasta 5E+05 KBq/m<sup>2</sup> a 5 km de distancia y de 2E+05 KBq/m<sup>2</sup> a 10 km de la fuente, que suponen cantidades de material radiactivo disponibles para incorporación al cuerpo por exposición indirecta (inhalación, absorción, inhalación por resuspensión).

En la Tabla 17 se presentan los resultados de Dosis por Inhalación, Resuspensión, *Groundshine* y Sumersión vs Distancia, para una mínima exposición (86 m altura de la pluma).

Pluma Línea Central, Altura Efectiva 86 m Mínima Exposición (Estabilidad D)				
Distancia (km)	Inhalación (Sv) (Paso de la Pluma)	Sumersión (Sv) (Paso de la Pluma)	Groundshine (Sv)	Resuspensión (Sv)
2.13	1.63E-01	5.21E-03	9.80E-02	1.26E-03
3.22	1.27E-01	4.06E-03	7.64E-02	9.81E-04
4.02	1.05E-01	3.34E-03	6.30E-02	8.09E-04
4.85	8.73E-02	2.79E-03	5.25E-02	6.74E-04
8.05	5.09E-02	1.62E-03	3.06E-02	3.93E-04
11.27	3.49E-02	1.11E-03	2.09E-02	2.69E-04
16.09	2.32E-02	7.41E-04	1.40E-02	1.79E-04
20.92	1.73E-02	5.51E-04	1.04E-02	1.33E-04
32.19	1.06E-02	3.39E-04	6.39E-03	8.20E-05
40.23	8.26E-03	2.64E-04	4.96E-03	6.38E-05

<b>50</b>	6.47E-03	2.07E-04	3.89E-03	5.00E-05
<b>64</b>	4.92E-03	1.57E-04	2.95E-03	3.80E-05
<b>80</b>	3.84E-03	1.23E-04	2.31E-03	2.96E-05
<b>85</b>	3.59E-03	1.15E-04	2.16E-03	2.77E-05

**Tabla 17 Resultados Mínima Exposición en Línea Central**

A 5 km de la fuente, la población puede inhalar hasta 90 mSv, mientras que a 10 km la dosis disponible para inhalación es de apenas 35 mSv. Radiación desde el material depositado en el suelo que puede ser inhalada a 11 km de la fuente es de 20 mSv dosis consideradas muy bajas, apenas por encima de los valores de dosis por radiación natural.

### **3.7.5. TOTAL, DE DOSIS EQUIVALENTE COMPROMETIDA EN ÓRGANOS (superior a 50 rem/0.5 Sv)**

A continuación, se presentan los resultados de Dosis Equivalentes Comprometidas para los Órganos que superan los 0.5 Sv en una exposición mínima. Esta dosis supone apariciones latentes de cáncer en la población residente.

#### **A 5 KM**

<b>Dosis Equivalente Comprometida en Órganos (Sv)</b>					
<b>Piel</b>	[7.5E-01]	<b>Pulmones</b>	[5.7E-01]	<b>Tiroides</b>	[9.0E-01]

Después de 5 Km no se alcanzan los 0.5 Sv de dosis comprometida en órganos.

El alcance en Hotspot se limita a algunas pocas horas después de la liberación de productos de fisión al medio ambiente, pero proporciona una estimación rápida y conservadora de los valores de TEDE para la población circundante a una distancia menor a 200 km, incluyendo valores de Dosis Equivalente Comprometida en aquellos órganos que reciben dosis mayores a 0.5 Sv lo cual supone además de efectos tales como apariciones latentes de cáncer, efectos deterministas en la población.

La aproximación obtenida con Hotspot se realiza considerando una clase de estabilidad y una velocidad promedio de viento para la región modelada.

El gráfico de perímetros de dosis generado por el código permite conocer el área que recibe las dosis altas y muy altas y ayudar en los planes de evacuación inmediata de la población circundante.

## 4. MELCOR ACCIDENT CONSEQUENCE CODE SYSTEM (MACCS)

MACCS es un código de Análisis de Consecuencias para evaluar los impactos de las liberaciones a la atmósfera de aerosoles radiactivos y vapores en la salud humana y al ambiente. El código incluye todas las vías relevantes de dosis: *cloudshine*, inhalación, contaminación de la piel, resuspensión, *groundshine* e ingestión. MACCS es primordialmente una herramienta de APS que da cuenta de la incertidumbre en el clima que es inherente a un accidente hipotético que podría ocurrir en el futuro.

WinMACCS es una interfaz fácil de usar para el procesamiento posterior de resultados de MACCS, permite una mayor facilidad de uso en el desarrollo del modelo de análisis.

MACCS se utiliza para estimar las dosis radiológicas, los efectos en la salud y las consecuencias económicas que podrían resultar de las liberaciones accidentales postuladas de materiales radiactivos a la atmósfera. La especificación de las características de liberación designados como “término fuente” puede consistir en hasta 20 plumas de Gauss, estos a menudo se refieren simplemente como “plumas”. La dirección, duración, calor sensible y la concentración inicial de radionúclidos puede variar de pluma a pluma.

Entre los códigos de análisis de consecuencias, MACCS es único en su capacidad para modelar acciones de mitigación a corto y largo plazo, y sus costos económicos asociados, junto con el modelado de efectos en la salud determinísticos como estocásticos. Los códigos de este tipo son usados primeramente para calcular el parámetro de dispersión apropiado para el transporte atmosférico de las plumas y cuantificar la dosis radiológica que recibe el MOI.

Los materiales radiactivos liberados se modelan como dispersos en la atmósfera mientras son transportados por el viento predominante. Durante el transporte, si hay o no precipitación, el material particulado se puede modelar como depositado en el suelo. Si los niveles de contaminación exceden un criterio especificado por el usuario, las acciones de mitigación pueden activarse para limitar las exposiciones a la radiación. Si se activan acciones mitigantes, los costos económicos de estas acciones se calculan y pueden reportarse. Hay dos aspectos de la estructura del código que son básicos para comprender sus cálculos:

(1) Los cálculos se dividen en módulos y fases y (2) la región que rodea a la instalación se divide en una cuadrícula de coordenadas polares.

El objetivo del desarrollo de MACCS está destinado a facilitar la realización de cálculos específicos del sitio, la evaluación de sensibilidades e incertidumbres y la futura incorporación de nuevos modelos fenomenológicos.

Para aplicaciones regulatorias, el código es usado para calcular el TEDE a 50 años para especificar receptores estacionarios de una liberación de radiactividad a la atmósfera.

La principal aplicación de MACCS ha sido su uso para los cálculos de NUREG-1150 (NRC 1987-1991), evaluando los riesgos planteados por la operación de 5 reactores de potencia comerciales.

MACCS también se ha utilizado en una serie de estudios relacionados con la regulación de reactores comerciales. Varias aplicaciones representativas son las siguientes:

- a. Evaluación del cambio propuesto en la Guía de la NRC relativa a densidad de población en la zona de planificación y emergencia (EPZ) de los reactores de potencia comerciales (Young, 1994)
- b. Definición de una liberación grande por la NRC (Hanson, Davis y Mubayi, 1994)
- c. Evaluación de las consecuencias económicas de los accidentes graves hipotéticos a plantas comerciales de generación de energía (Mubayi, Sailor y Anandalingam, 1995).

Cuando MACCS se utiliza para estudios de la Ley Nacional de Política Ambiental (NEPA) tales como Estudios de Impacto Ambiental (EIS), los resultados de los cálculos se utilizan generalmente para comparar los riesgos de accidente planteados por diversas alternativas. Los resultados de un análisis MACCS pueden usarse para determinar si una acción propuesta daría lugar a impactos significativos en el medio ambiente.

La variabilidad meteorológica puede ser tratada en MACCS con un algoritmo de muestreo aleatorio estratificado. En función de la distribución muestreada y la aplicación de los modelos de dosis y/o efectos de salud especificados por el usuario, se calculan funciones de distribución acumulativa complementarias (CCDFs) para diversas medidas de consecuencia. Los percentiles de dosis 50, 90, 95, 99 y 99.5 se proporcionan en el output, así como los valores medios y máximos.

Los resultados son interpretados con respecto al riesgo individual de fatalidad y al riesgo individual de muerte latente por cáncer para cuantificar el riesgo.

MACCS está dividido en los 3 módulos primarios: ATMOS, EARLY y CHRONC. La división está basada en la secuencia de respuestas sociales que seguiría a la ocurrencia de un accidente. Las fases son definidas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y se conocen como fase de emergencia, fase intermedia y fase a largo plazo.

## 4.1. MÓDULO ATMOS: TRANSPORTE ATMOSFÉRICO Y DEPOSICIÓN

ATMOS realiza todos los cálculos relacionados con el transporte atmosférico, la dispersión y deposición, así como la desintegración radiactiva que ocurre antes de la liberación y mientras el material está en la atmósfera.

Calcula la dispersión y deposición de material liberado a la atmósfera en función de la distancia. Utiliza un modelo de pluma gaussiana con parámetros de dispersión Pasquill-Gifford. Los fenómenos que ATMOS trata son:

(1) Efectos tempranos, (2) elevación de la pluma por efecto de flotabilidad, (3) dispersión de la pluma durante el transporte, (4) deposición húmeda y seca y (5) decaimiento radiactivo.

En el punto medio de cada intervalo espacial a lo largo de la ruta de transporte, se calculan concentraciones en aire y suelo de todos los radionúclidos, así como información diversa sobre el tamaño de la pluma, altura y tiempo de transporte.

El transporte y la deposición en ATMOS se tratan como un modelo unidimensional. Los valores de concentración se calculan solo para la línea central de la pluma. No hay cálculos en ATMOS de concentraciones fuera de línea central. El ajuste para la ubicación fuera de la línea central se modela en EARLY y CHRONC.

## 4.2. MÓDULO EARLY: CÁLCULOS PARA FASE DE EMERGENCIA

El módulo EARLY modela el periodo de tiempo inmediato a la liberación radiactiva, este periodo es comúnmente referido como fase de emergencia. Puede ser extendida a una semana después del arribo de la primera pluma a cualquier intervalo especial corriente abajo

La fase de emergencia comienza, en cada punto de distancia sucesivo a favor del viento cuando la primera pluma de la liberación llega. La duración de la fase de emergencia la especifica el usuario y puede oscilar entre 1 y 7 días. Las vías de exposición consideradas durante este período son *cloudshine*, *groundshine* e inhalación por resuspensión. Las acciones mitigantes que se pueden especificar para la fase de emergencia incluyen: evacuación, refugio y reubicación dependiente de la dosis.

## 4.3. MÓDULO CHRONC: FASE A LARGO PLAZO

Las vías de exposición consideradas durante este período son *groundshine*, inhalación por resuspensión y por ingestión de alimentos y agua, aquellas que resultan del material depositado en el suelo. Un número de medidas de protección puede modelarse en la fase a largo plazo para reducir los niveles de dosis especificados por el usuario: descontaminación, interdicción temporal y condena.

Las acciones de mitigación se modelan por separado para dos usos de tierra: residencial y agrícola.

Se calculan dos tipos de dosis: (1) dosis agudas usadas para calcular las muertes tempranas y lesiones y (2) tiempo de vida de dosis comprometida usada para calcular los cánceres resultantes de la exposición temprana. La acumulación de dosis de radiación de la exposición temprana depende en gran medida de la que se asume como respuesta a una emergencia, es decir, evacuación, refugio o traslado temprano. *Cloudshine* y exposición a la nube por inhalación están limitadas al tiempo de paso de la nube. *Groundshine* y la dosis de inhalación por resuspensión por exposición temprana están limitadas a la duración de la emergencia.

#### 4.3.1. DOSIS AGUDAS

Se calculan con el único propósito de estimar los efectos de salud "deterministas", esto puede ser como resultado de altas dosis administradas a altas tasas de dosis. Tales condiciones pueden ocurrir en la proximidad inmediata de una planta de energía después de accidentes graves hipotéticos donde se supone que ocurre una falla de la contención. Algunos ejemplos de los efectos en la salud que son basados en dosis agudas son: muerte temprana, vómito prodrómico e hipotiroidismo. Con solo unas pocas excepciones, enfocadas en los riesgos para los trabajadores en sitio de las instalaciones del DOE, la necesidad de calcular las dosis agudas se ha limitado generalmente a los análisis de centrales eléctricas comerciales.

#### 4.3.2. DOSIS DE POR VIDA

Estas son las dosis comprometidas para tejidos específicos (por ejemplo, médula roja y pulmones) y/o la suma ponderada de las dosis para tejidos definidas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP-1991) y denominada "dosis efectiva". Las dosis de por vida se pueden usar para calcular el riesgo estocástico de efectos en la salud resultante de la exposición a la radiación. MACCS usa la dosis calculada de por vida en los cálculos de riesgo de muerte por cáncer.

MACCS muestra nombres de órganos con el prefijo A o L. Los órganos con A son usados para calcular dosis de exposición temprana en el módulo EARLY, órganos con el prefijo L son usados para calcular dosis comprometidas a largo plazo.

### 4.4. MODELADO FENOMENOLÓGICO

La secuencia en el que los fenómenos se evalúan estrechamente sigue el orden temporal de los eventos que ocurren en el mundo real en el caso de un accidente en la instalación. Los modelos fenomenológicos incorporados en el

código utilizan datos empíricos, a menudo tienen soluciones analíticas y computacionalmente sencillas.

### **MODELOS FENOMENOLÓGICOS PARA ATMOS**

- Especificación del Término Fuente
- Datos Meteorológicos
- Pluma de Riesgo Dominante
- Dimensiones Iniciales de la Pluma
- Transporte de la pluma
- Elevación de la Pluma
- Dispersión, Modelo de Pluma Gaussiana
- Concentraciones en Aire y Suelo

### **MODELOS FENOMENOLÓGICOS PARA EARLY**

- Especificación de las Vías de Exposición
- *Cloudshine*
- *Groundshine*
- Inhalación Directa
- Inhalación por Resuspensión
- Costos de reubicación en Fase de Emergencia
- Evacuación
- Protección
- Reubicación dependiente de la Dosis
- Efectos agudos en la salud: modelos de muerte prematura y lesiones tempranas
- Modelos de efectos para la salud: cáncer

## **4.5. RÉGIMENES FENOMENOLÓGICOS DE APLICABILIDAD**

Los principales regímenes fenomenológicos que se deben considerar antes de aplicar en el modelo gaussiano incluyen:

- Régimen temporal, el uso de estos códigos es más adecuado para plumas de duración “corta” que van desde aproximadamente varios minutos hasta varios días.
- Régimen espacial, no modela la dispersión cerca de la fuente (menos de 100 metros de la fuente), especialmente cuando la influencia de las estructuras u otros obstáculos es significativa.
- La clase de códigos como MACCS debe aplicarse con precaución a distancias mayores de diez y quince millas, especialmente si las condiciones meteorológicas son probablemente diferentes a las de la fuente de liberación.



- Variabilidad del terreno. Los modelos gaussianos son intrínsecamente modelos de terreno plano y funcionan mejor en éste, ya que, la variación del terreno es mínima. Por eso hay un conservadurismo inherente si los entornos tienen importantes edificios cercanos, vegetación alta o variaciones graduales que no se tienen en cuenta en la parametrización de las dispersiones.
- Flotación térmica. El enfoque de Briggs para la contabilidad de la energía sensible de una pluma es válido para liberaciones a campo abierto, o si se usa en combinación con efectos de estela.
- Aplicabilidad del factor de dosis de conversión. El usuario debe asegurarse que los factores de conversión de dosis usados en MACCS sean aplicables a los radionúclidos en el término fuente y sus características fisicoquímicas [7].

**MACCS está ligado a los siguientes archivos:**

#### 4.6. DATOS DE ENTRADA: DATOS METEOROLÓGICOS

El archivo consiste en un año de registros por hora (8760 h/año) de la dirección del viento, velocidad del viento, estabilidad atmosférica y precipitación acumulada, en general los datos se toman de ya sea el sitio de la instalación o de una estación meteorológica cercana.

#### 4.7. DATOS DE ENTRADA: FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS (DCF)

Los **DCFs** generados por un archivo de MACCS, representan la dosis individual que resultaría de la exposición a una unidad de concentración de un radionúclido a través de 4 vías que se toman separadamente: *cloudshine*, *groundshine*, inhalación e ingestión.

**DCFs** (Dose Conversion Factors) relacionan las concentraciones ambientales y las ingestas para generar dosis humanas para vías de exposición, órganos y radionúclidos específicos. Las dosis surgen tanto de exposiciones internas como externas. Las exposiciones internas consisten en inhalación (de la pluma y de la resuspensión) y la ingestión. Las exposiciones externas provienen de *cloudshine*, *groundshine*, deposición en piel y radiación directa.

**DCFs** (*cloudshine*): Representa la dosis (en Sieverts) que un órgano en particular de un individuo recibiría si se expone un determinado tiempo a una unidad

de concentración en aire en unidades del SI (becquerel-segundo por metro cúbico, Bq s m<sup>3</sup>) de un radionúclido.

Se generan tres DCFs para *groundshine*, todos referidos a una unidad de concentración en suelo (becquerel por metro cuadrado, Bq\*m<sup>2</sup>)

1. Velocidad de Dosis (Sieverts por segundo, Sv/s)
2. Dosis Integrada en el tiempo por 8 horas de exposición (sieverts)
3. Dosis integrada en el tiempo por una semana de exposición (sieverts)

Los DCFs para inhalación generados por DOSFAC son generados en pares, el primer valor del par es usado en MACCS para calcular los efectos agudos a la salud, el segundo valor es para la dosis efectiva comprometida.

Los DCF de ingestión para una unidad representan el equivalente de dosis efectivo que se acumulará en un individuo durante el período, fijado por convención, a 50 años que siguen a una ingestión de material radiactivo en su organismo. Ambos, inhalación e ingestión son en unidades de sieverts por becquerel de ingesta.

60 radionúclidos son considerados significativos en los análisis de consecuencias de accidentes en reactores de agua ligera.

Además, se generan DCFs para 20 órganos importantes de acuerdo con el equivalente de dosis efectivo (EDE) establecida por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en la Publicación 26 (ICRP, 1977). DOSFAC además genera DCFs para la dosis efectiva definida en el ICRP 60.

Los radionúclidos se dividen en grupos que comparten características físicas y químicas similares. Los datos de desintegración radiactiva (vida media y esquemas de desintegración) se proporcionan a MACCS en el archivo DOSFAC, éste debe incluir datos para cada uno de los radionúclidos definidos en EARLY.

Los radionúclidos dependen del grupo de elementos al que están asignados. Todos los miembros de un grupo de elementos tienen las mismas características de deposición y fracción de liberación.

Elemento	Núclido
<b>Cobalto</b>	58, 60
<b>Criptón</b>	85, 85m, 87, 88
<b>Rubidio</b>	86
<b>Estroncio</b>	89, 90, 91, 92
<b>Itrio</b>	90, 91, 92, 93
<b>Circonio</b>	95, 97
<b>Niobio</b>	95
<b>Molibdeno</b>	99
<b>Tecnecio-99m</b>	99m
<b>Rutenio</b>	103, 105, 106
<b>Rodio</b>	105

<b>Antimonio</b>	127, 129
<b>Telurio</b>	127, 127m, 129, 129m, 131m, 132
<b>Yodo</b>	131, 132, 133, 134, 135
<b>Xenon</b>	133, 135
<b>Cesio</b>	134, 136, 137
<b>Bario</b>	139, 140
<b>Lantano</b>	140, 141, 142
<b>Cerio</b>	141, 143, 144
<b>Praseodimio</b>	143
<b>Neodimio</b>	147
<b>Neptunio</b>	239
<b>Plutonio</b>	238, 239, 240, 241
<b>Americio</b>	241
<b>Curio</b>	242, 244

**Tabla 18 Nucleídos utilizados en el Análisis de Consecuencias en MACCS**

<b>Órganos DOSFAC2</b>	
Estómago	Glándulas Suprarrenales
Intestino Delgado	Pared de la vejiga
Pulmones	Riñones
Médula ósea	Hígado
Tiroides	Páncreas
Intestino grueso	Bazo
Superficie Ósea	Glándula del Timo
Senos	Equivalente de Dosis efectivo
Testículos	Dosis Efectiva
Ovarios	

**Tabla 19 Órganos considerados en la generación de DCFs**

## 4.8. DATOS DE ENTRADA: INFORMACIÓN DEL SITIO

Las regiones económicas definidas en éste, se identifican como elementos espaciales en el bloque de índice de datos.

**Watershed Index.** Para cada uno de los radionúclidos considerados en los modelos de vías de absorción líquidas, se debe especificar una fracción inicial de fracción inicial de “lavado” (washoff) y una tasa anual de washoff ( $\text{año}^{-1}$ ) con un factor de ingestión ( $\text{Bq ingerido/Bq en agua}$ ) para cada uno de las clases de cuencas hidrológicas.

**Cultivos: Estaciones de Crecimiento.** La duración de la estación de crecimiento y la fracción promedio de la superficie agrícola en el sitio de cada tipo de cultivo.

**Información de las Regiones Económicas.** (1) Fracción de suelo dedicado a la agricultura por región, (2) Fracción de ventas resultado de la producción diaria en la región, (3) Total Anual de ventas para la región (dólares por hectárea), (4) Valor de la propiedad agrícola por región (dólares/hectárea), (5) Valor de la propiedad no agrícola por región.

El archivo de datos de sitio es necesario para el análisis en el Modulo CHRONC.

## 4.9. DATOS DE ENTRADA: PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE UNA LIBERACIÓN

Algunos parámetros descriptivos de la liberación en MACCS son los que siguen:

**Tamaño Inicial de la Pluma.** Está determinado por el ancho y la altura del edificio fuente. La altura del edificio también se utiliza para determinar si la pluma es arrastrada en la región turbulenta que rodea el edificio. En consecuencia, además del tamaño inicial de la pluma, la altura del edificio se usa para determinar si se producirá una elevación de la pluma flotante.

La dispersión de una pluma de material liberado desde la estela de un edificio alto está sujeta a un grado de incertidumbre. Por esa razón, MACCS no debe usarse para estimar dosis en distancias menores a 0.5 km en instalaciones de escala industrial.

Diferentes alturas de liberación, contenidos energéticos, duración de liberación y dimensiones iniciales pueden ser asignados a cada pluma. Solo una distribución de tamaño de partícula puede ser asignada para cada grupo de elementos químicos.

MACCS utiliza un sistema de coordenadas polares para representar la región que rodea a las instalaciones. La instalación en sí siempre se encuentra en el punto central del sistema de coordenadas ( $r=0$ ).

Las concentraciones en aire y tierra se calculan para ser representativas de la longitud total del elemento espacial. Los valores de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  representativos del intervalo espacial son valores promedio, como sigue,  $\sigma_{promedio} = 0.5 (\sigma_{inicial} + \sigma_{final})$ , donde  $\sigma_{inicial}$  es el tamaño de la pluma al entrar en el intervalo espacial y  $\sigma_{final}$  es el tamaño de la pluma sobre el intervalo espacial. Los procesos de deposición se promedian de manera similar a lo largo del intervalo espacial.

## 4.10. PROCESAMIENTO DE DATOS DE SALIDA

Para las aplicaciones de APS, las consecuencias radiológicas se presentan en forma de una función de **distribución acumulativa complementaria (CCDF), que es un estimado de la distribución de magnitudes de la consecuencia** y como valores de riesgo promedio:

*[Consecuencias promedio de liberación radiológica] X [frecuencia esperada de categoría de liberación]*

Esto se suma a todas las categorías de liberación posibles para obtener la media total de riesgo de accidente severo en el nivel 3.

## 4.11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA PLUMA

La mayoría de los análisis de riesgo utilizan actualmente modelos de dispersión de terreno plano sin considerar los efectos de la construcción.

Este estudio se incorpora para observar los efectos de flotabilidad, las dimensiones iniciales de la pluma y los efectos de estela en las liberaciones.

**Efectos de Estela.** Las liberaciones de venteos y pequeñas plumas pueden ser arrastradas detrás del edificio dentro de la cavidad debido al efecto aerodinámico de la construcción en la dirección de viento en la cual la liberación ocurre <sup>[11]</sup>.

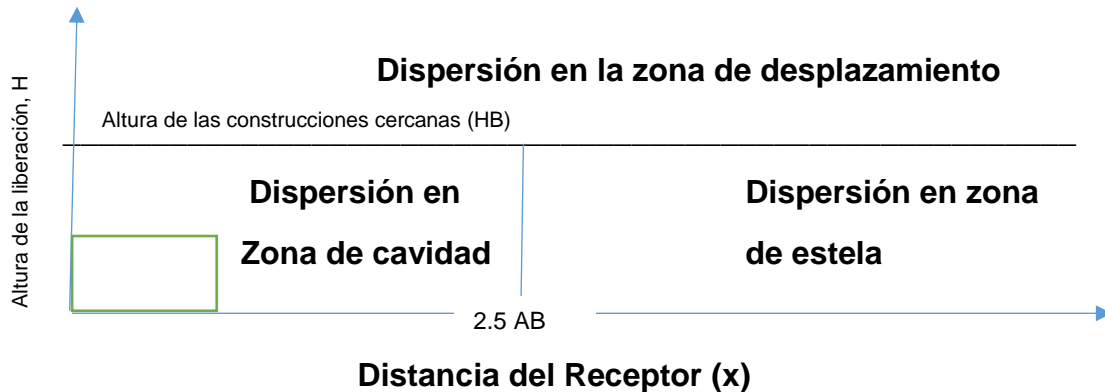
Al evaluar las capacidades de MACCS para las liberaciones con efectos de estela, los códigos asumen que las dimensiones verticales y horizontales de la pluma se incrementan a través de mezclarse con el aire ambiente causado por la estela turbulenta. Las dimensiones se basan en los datos de entrada del usuario (alto y ancho del edificio), para los parámetros iniciales de dispersión de la pluma (Sigma y) y vertical (sigma z) y el ajuste inicial de la pluma (ancho/4.3) y alto/2.15, respectivamente.

MACCS aplica un enfoque simple para determinar la elevación de una pluma flotante desde su punto de liberación. Se basa en un criterio de flotabilidad que establece que el aumento de la pluma ocurrirá por las velocidades del viento a la altura de la liberación por debajo de un valor crítico de velocidad del viento <sup>[15]</sup>.

El efecto de estela es dependiente de las dimensiones iniciales de la pluma (definidas por las dimensiones del edificio), la flotabilidad e impulso de esta, así como de la velocidad del viento.

En la figura 7 se representan las zonas de estela y cavidad a sotavento de una instalación nuclear. La dirección a favor del viento es x, la altura de la instalación es HB y AB es la sección transversal proyectada del edificio que más influye en el

flujo de la pluma. Para la mayoría de los límites y propósitos, se puede suponer que AB es el área superficial de la pared más grande del edificio más cercano al receptor. Para una aproximación, se puede considerar que la extensión de la zona de cavidad es aproximadamente una distancia a favor del viento de 2.5 AB. La zona de estela puede ser 10 veces AB. Para tener en cuenta los efectos aerodinámicos del edificio, el parámetro de dispersión a nivel del suelo es modificado.



**Figura 7 Zonas de cavidad y estela de una construcción**

Lo que impulsa una pluma térmica también llamada “chorro flotante” es su flujo de calor, definido como la cantidad de calor (expresado en Julios) que se descarga a través del orificio de salida por unidad de tiempo, estas plumas cuentan con propulsión adicional a la flotabilidad las cuales se elevan bajo la acción combinada de flotabilidad e impulso siendo un fluido más denso que se mezcla con el aire a lo largo de su transporte.

La mayoría de los términos fuente radiológicas se pueden tratar como neutralmente flotantes. Se supone que la nube del material liberado tiene aproximadamente la misma densidad que el aire [7].

## **DATOS UTILIZADOS PARA MODELAR CADA TIPO DE PLUMA.**

### **Suposiciones:**

**Dimensiones iniciales de la pluma:** 9.6 x 31.8 m

**Altura del edificio:** 68.45 m (Tomado del FSAR)

**Energía de la pluma:** 5.0E+06 Watts (Accidente teórico)

**Tiempo que dura la liberación:** 30 minutos (de NUREG-1140)

1. Pluma Gaussiana Simple (0)

**Altura del Edificio:** 0 m  
**Valor Inicial de Sigma-Y:** 0 m  
**Valor Inicial de Sigma-Z:** 0 m  
**Energía de la pluma:** 0 Watts

2. Pluma Flotante con efectos de Estela

**Altura del Edificio:** 68.45 m  
**Valor Inicial de Sigma-Y:** 9.6 m  
**Valor Inicial de Sigma-Z:** 31.8 m  
**Energía de la pluma:** 5.0E+06 Watts

3. Pluma Flotante (caso base en área abierta)

**Altura del Edificio:** 0 m  
**Valor Inicial de Sigma-Y:** 0 m  
**Valor Inicial de Sigma-Z:** 0 m  
**Energía de la pluma:** 5.0E+06 Watts

4. Pluma no Flotante con efectos de Estela

**Altura del Edificio:** 68.45 m  
**Valor Inicial de Sigma-Y:** 9.6 m  
**Valor Inicial de Sigma-Z:** 31.8 m  
**Energía de la pluma:** 0 Watts (pluma neutralmente flotante)

Caso	Estabilidad de Clase D	
	Velocidad de Viento (4.5 m/s)	Velocidad de Viento (2.3 m/s)
Pluma Gaussiana Simple	•	•
Pluma flotante con efectos de estela	•	•
Pluma Flotante	•	•
Pluma no flotante con efectos de estela	•	•

**Tabla 20 Casos de Análisis**

Los resultados ( $x/Q$  vs distancia) y concentración en aire a nivel del suelo ( $Bq \cdot s/m^3$ ) para los casos de 4.5 m/s y 2.3 m/s se muestran en las siguientes tablas:

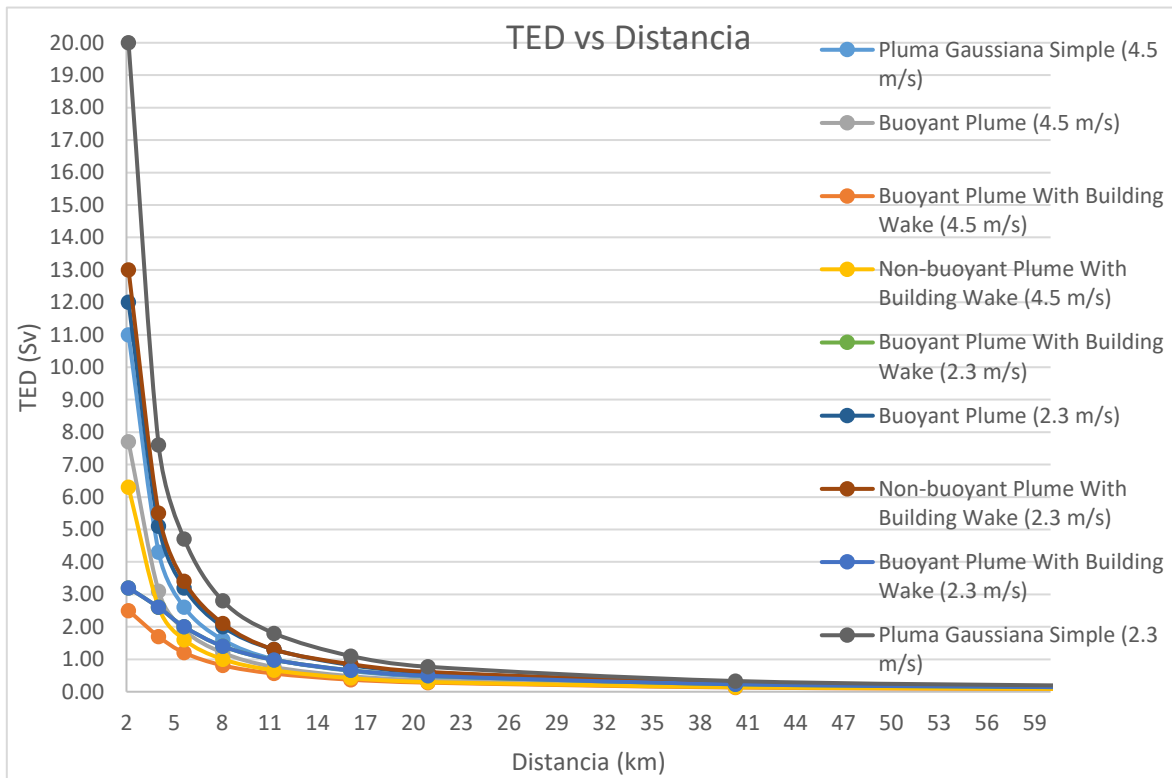
Distancia (km)	Pluma Gaussiana Simple	Pluma Flotante con Efectos de Estela	Pluma Flotante	Pluma No Flotante con Efectos de Estela
	Velocidad de Viento (4.5 m/s)			
	TED (Sv)			
1.61	1.70E+01	2.60E+00	1.20E+01	1.00E+01
2.13	1.10E+01	2.50E+00	7.70E+00	6.30E+00
4.02	4.30E+00	1.70E+00	3.10E+00	2.60E+00
5.63	2.60E+00	1.20E+00	1.90E+00	1.60E+00
8.05	1.60E+00	8.10E-01	1.20E+00	1.00E+00
11.27	1.00E+00	5.60E-01	7.60E-01	6.60E-01
16.09	6.40E-01	3.70E-01	4.80E-01	4.20E-01
20.92	4.60E-01	2.80E-01	3.50E-01	3.00E-01
40.23	2.10E-01	1.30E-01	1.60E-01	1.40E-01
64	1.20E-01	7.80E-02	9.30E-02	8.20E-02
80	9.20E-02	6.10E-02	7.20E-02	6.40E-02

Tabla 21 Valores de TED (Velocidad de viento 4.5 m/s)

Distancia (km)	Pluma Gaussiana Simple	Pluma Flotante con Efectos de Estela	Pluma Flotante	Pluma No Flotante con Efectos de Estela
	Velocidad de Viento (2.3 m/s)			
	TED (Sv)			
1.61	3.20E+01	2.80E+00	1.70E+01	2.00E+01
2.13	2.00E+01	3.20E+00	1.20E+01	1.30E+01
4.02	7.60E+00	2.60E+00	5.10E+00	5.50E+00
5.63	4.70E+00	2.00E+00	3.20E+00	3.40E+00
8.05	2.80E+00	1.40E+00	2.00E+00	2.10E+00
11.27	1.80E+00	9.80E-01	1.30E+00	1.30E+00
16.09	1.10E+00	6.60E-01	8.20E-01	8.50E-01
20.92	7.70E-01	4.90E-01	5.90E-01	6.10E-01
40.23	3.30E-01	2.30E-01	2.60E-01	2.70E-01
64	1.80E-01	1.30E-01	1.50E-01	1.50E-01
80	1.40E-01	1.00E-01	1.10E-01	1.20E-01

Tabla 22 Valores de TED (Velocidad de viento 2.3 m/s)





**Gráfico 6 TED vs Distancia Análisis de Sensibilidad de la pluma**

Las tendencias generales son las siguientes:

Los valores de TED más altos son los obtenidos de los casos de plumas no flotantes a una velocidad de viento de 2.3 m/s, esto debido a que las concentraciones a 2.3 m/s son aproximadamente dos veces más grandes que las correspondientes a 4.5 m/s en plumas no flotantes, lo cual resulta en dosis efectivas totales mayores. En cambio, los valores más bajos de TED se muestran en el caso de plumas flotantes con efectos de estela debido a que agregar flotabilidad y efectos de estela combinados reduce aún más la concentración de material radiactivo a nivel del suelo.

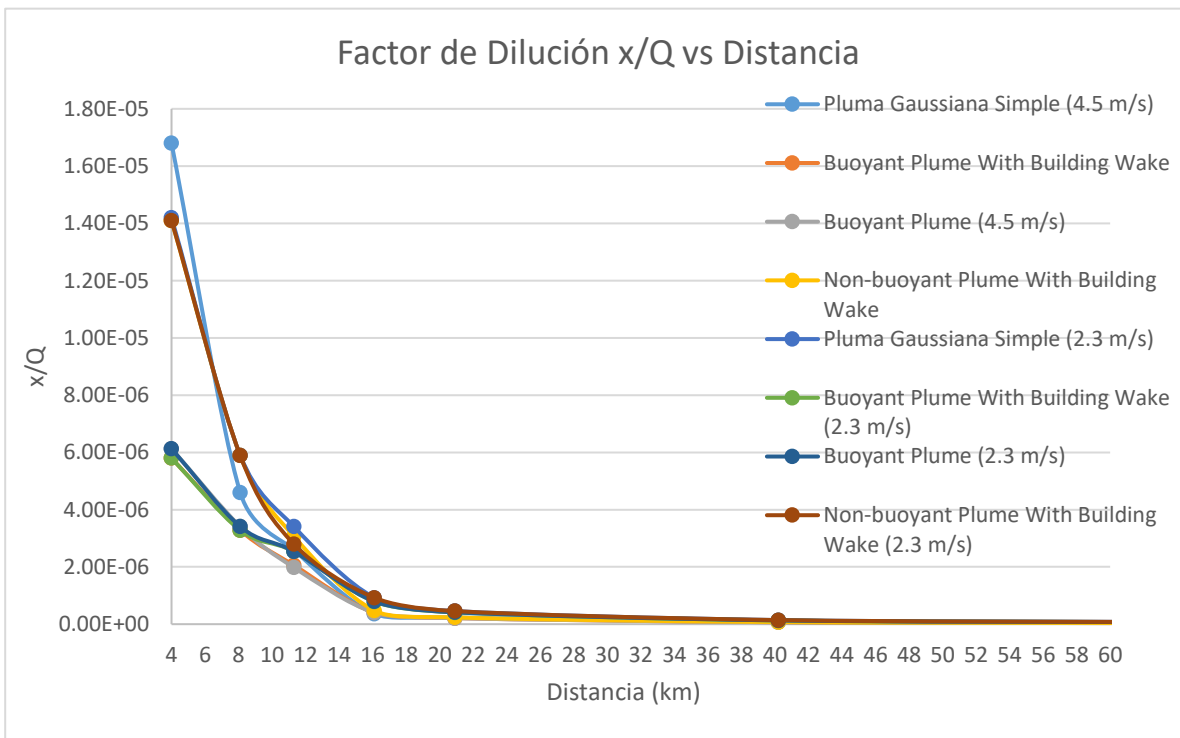
Distancia (km)	Pluma Gaussiana Simple	Pluma Flotante con Efectos de Estela	Pluma Flotante	Pluma No Flotante con Efectos de Estela
	Velocidad de Viento (4.5 m/s)			
	x/Q			
4	1.68E-05	5.80E-06	6.13E-06	1.41E-05
8.1	4.60E-06	3.28E-06	3.41E-06	5.89E-06
11.3	2.60E-06	2.06E-06	1.98E-06	3.07E-06
16.1	3.64E-07	4.03E-07	4.06E-07	4.73E-07
20.9	2.34E-07	2.10E-07	2.11E-07	2.34E-07
40.2	7.33E-08	6.75E-08	6.75E-08	7.33E-08

64.4	3.79E-08	3.54E-08	3.54E-08	3.79E-08
80.5	1.99E-08	2.49E-08	2.49E-08	2.65E-08

**Tabla 23 Factores de Dilución (velocidad de viento 4.5 m/s)**

Distancia (km)	Pluma Gaussiana Simple	Pluma Flotante con Efectos de Estela	Pluma Flotante	Pluma No Flotante con Efectos de Estela
	Velocidad de Viento (2.3 m/s)			
	x/Q			
4	1.42E-05	5.80E-06	6.13E-06	1.41E-05
8.1	5.90E-06	3.28E-06	3.41E-06	5.89E-06
11.3	3.41E-06	2.54E-06	2.54E-06	2.80E-06
16.1	9.25E-07	7.88E-07	7.94E-07	9.25E-07
20.9	4.58E-07	4.11E-07	4.13E-07	4.57E-07
40.2	1.43E-07	1.32E-07	1.32E-07	1.43E-07
64.4	7.42E-08	6.92E-08	6.92E-08	7.42E-08
80.5	5.19E-08	4.88E-08	4.88E-08	5.19E-08

**Tabla 24 Factores de Dilución (velocidad de viento 2.3 m/s)**



**Gráfico 7 Parámetro de dispersión( $x/Q$ ) vs Distancia (Análisis de Sensibilidad de la pluma)**

El valor de  $x/Q$  es dependiente de las dimensiones iniciales de la pluma, la velocidad del viento y los efectos de estela.

Los valores más altos de  $x/Q$  son calculados en el caso de pluma simple Gaussiana  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $H=0$  y sin efectos de estela. Los valores más bajos de  $x/Q$  en la línea central son calculados en el caso de pluma flotante con efectos de estela.

Una velocidad de viento de 2.3 m/s al propiciar una menor dispersión. Vientos más fuertes aumentarán en gran medida la dispersión de la liberación.

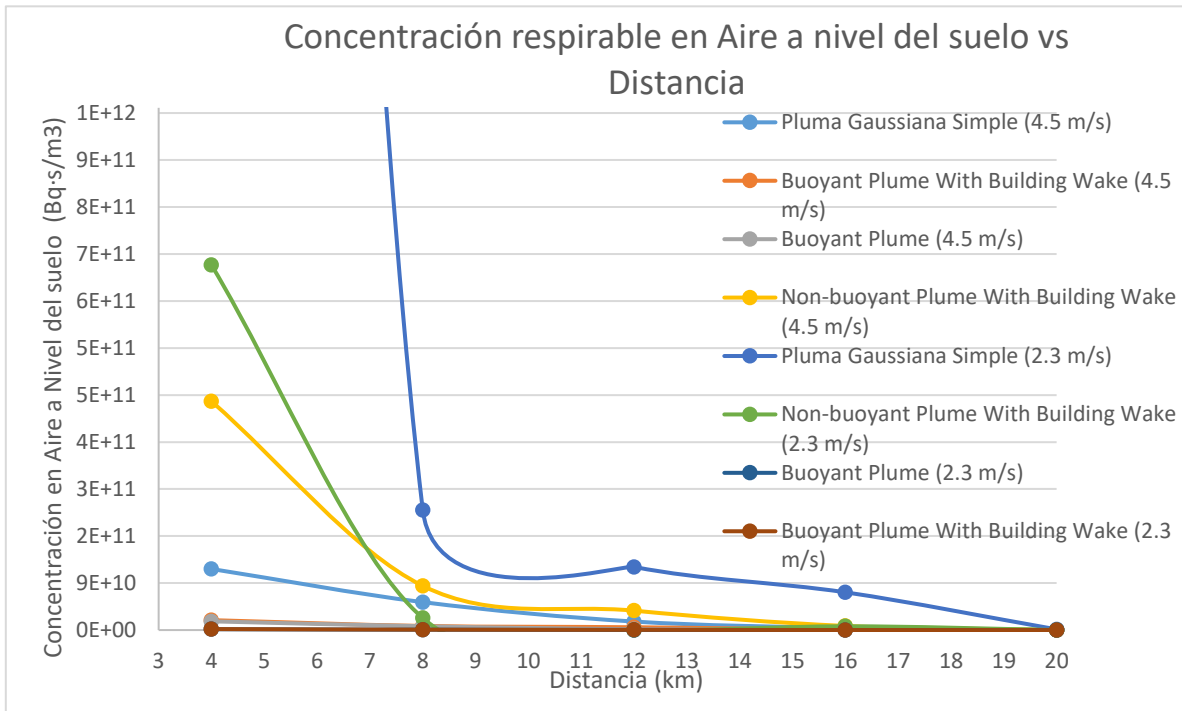
El calor sensible proporciona un parámetro de dispersión de una orden de magnitud más bajo que sin calor sensible. Este efecto es importante a poca distancia, pero se vuelve pequeño después de varias millas.

Distancia (km)	Pluma Gaussiana Simple	Pluma Flotante con Efectos de Estela	Pluma Flotante	Pluma No Flotante con Efectos de Estela
	Velocidad de Viento (4.5 m/s)			
	Concentración a nivel del suelo (Bq·s/m <sup>3</sup> )			
4	1.17E+11	1.90E+10	1.67E+10	4.38E+11
8	5.35E+10	7.91E+09	7.36E+09	8.47E+10
12	1.63E+10	5.44E+09	1.67E+09	3.72E+10
16	3.93E+09	8.49E+08	8.03E+08	7.88E+09
20	1.77E+08	3.26E+08	3.09E+08	1.77E+08
40	8.16E+06	3.17E+07	2.98E+07	8.17E+06
60	4.09E+05	6.98E+06	6.52E+06	4.10E+05

Tabla 25 Concentración a nivel del suelo (velocidad de viento 4.5 m/s)

Distancia (km)	Pluma Gaussiana Simple	Pluma Flotante con Efectos de Estela	Pluma Flotante	Pluma No Flotante con Efectos de Estela
	Velocidad de Viento (2.3 m/s)			
	Concentración a nivel del suelo (Bq·s/m <sup>3</sup> )			
4	6.97E+12	1.90E+09	1.67E+09	6.99E+11
8	2.30E+11	7.91E+08	7.36E+08	2.31E+10
12	1.21E+11	4.56E+08	2.03E+08	9.43E+10
16	7.23E+10	1.39E+08	1.31E+08	7.24E+09
20	1.36E+09	2.48E+07	2.36E+07	1.37E+08
40	5.74E+07	7.04E+06	6.57E+06	5.74E+06
60	2.97E+06	5.47E+05	5.11E+05	2.98E+05

Tabla 26 Concentración a nivel del suelo (2.3 m/s)



**Gráfico 8 Concentración en aire vs Distancia Análisis de Sensibilidad de la pluma**

La flotabilidad induce la elevación de la pluma que resulta en concentraciones más bajas a nivel del suelo, la altura del edificio aumenta la dispersión inicial de la pluma en las direcciones horizontal y vertical, lo que resulta también en concentraciones bajas.

Las concentraciones a 2.3 m/s de velocidad del viento son aproximadamente dos veces más grandes que las correspondientes a 4.5 m/s en plumas no flotantes.

Esta tendencia refleja la proporcionalidad inversa de la concentración respecto a la velocidad del viento en el modelo gaussiano. Para plumas flotantes, a velocidades de viento de 4.5 m/s se presentan concentraciones de una magnitud mayor que las correspondientes a 2.3 m/s. La elevación de la pluma debido a la flotabilidad es más pronunciada a baja velocidad del viento.

MACCS usa un criterio de despegue basado en una velocidad crítica que es una función del flujo flotante y la altura del edificio. El flujo flotante es directamente proporcional a la tasa de calor sensible de la liberación. Si la velocidad del viento es lo suficientemente alta, entonces la pluma no escapa a los efectos. La velocidad crítica del viento (criterio de despegue 3.4 m/s) define la velocidad máxima de viento que permitirá que la pluma flotante escape de la estela y suba mientras es transportada a sotavento.

La velocidad del viento 2.3 m/s está debajo de la velocidad crítica y los resultados muestran que la flotabilidad de la pluma ahora se tiene en cuenta. Aquí las concentraciones a sotavento por los efectos combinados de flotabilidad y efectos

de estela son sustancialmente menores que aquellas calculadas con solamente efectos de estela. También son ligeramente más altas que las calculadas para distancias entre los primeros 1000 a 2000 m por efectos de flotabilidad de la pluma.

Para el caso que combina los efectos de la flotabilidad de la pluma y los efectos de estela, la pluma se eleva, pero la dispersión desde la estela incrementa la extensión vertical de la pluma y aumenta la concentración en el segmento de pluma que entra en contacto con el suelo. Por lo tanto, a nivel del suelo, las concentraciones son mayores en comparación con las de una pluma flotante a campo abierto para los primeros 2000 metros de recorrido de una pluma. Después de esta distancia, los factores de dilución están a un mismo punto.

#### 4.12. RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL MÓDULO "ATMOS"

- Concentraciones en aire y suelo para el radionúclido seguido (dentro de la simulación de MACCS se tiene la opción seguir a uno de los radionúclidos incluidos en el término fuente)
- Radiactividad total en suelo
- Resultados para el radionúclido y punto espacial solicitado por el usuario tales como:
- Concentración en aire en línea central ( $Bq \cdot s/m^3$ ), Concentración en aire a nivel del suelo ( $Bq \cdot s/m^3$ ), Deposición en línea central ( $Bq/m^2$ ), Concentración Total en suelo en línea central ( $Bq/m^2$ ), Parámetro de dispersión ( $x/Q$ ) Tamaño de la pluma  $\delta y$  horizontal (m),  $\delta z$  (m) vertical, Altura de la línea central de la pluma (m), Momento de arribo al punto central de la pluma (s).

#### 4.13. RESULTADOS MÓDULO "ATMOS" PARA I-131

Considerando una liberación de 10% de Cs-I del inventario inicial del núcleo.

Pluma 1 I-131 [3.22,4.02](km)	Media
Concentración en Aire Línea Central ( $Bq \cdot s/m^3$ )	1.36E+08
Concentración en Aire a nivel del suelo ( $Bq \cdot s/m^3$ )	5.21E+07
Deposición en Línea Central ( $Bq/m^2$ )	3.50E+07
Concentración en Suelo en Línea Central ( $Bq/m^2$ )	6.03E+09
$x/Q$ Dilución a nivel del suelo ( $s/m^3$ )	6.99E-06
Dispersión Horizontal (m)	6.89E+02
Dispersión Vertical (m)	1.93E+03
Altura de la pluma en Línea Central (m)	1.23E+02
Tiempo de arribo de la Pluma (s)	1.22E+04

Tabla 27 Resultados Pluma 3.22-4.02 km I-131

Pluma 1 I-131 [5.6, 8.1](km)	Media
Concentración en Aire Línea Central (Bq-s/m <sup>3</sup> )	3.10E+07
Concentración en Aire a nivel del suelo (Bq-s/m <sup>3</sup> )	1.64E+07
Deposición en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	1.06E+07
Concentración en Suelo en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	1.86E+09
x/Q Dilución a nivel del suelo (s/m <sup>3</sup> )	2.91E-06
Dispersión Horizontal (m)	1.21E+03
Dispersión Vertical (m)	5.74E+03
Altura de la pluma en Línea Central (m)	1.23E+02
Tiempo de arribo de la Pluma (s)	1.41E+04

Tabla 28 Resultados Pluma 5.6-8.1 km I-131

Pluma 1 I-131 [11.3, 16.1] (km)	Media
Concentración en Aire Línea Central (Bq-s/m <sup>3</sup> )	1.47E+06
Concentración en Aire a nivel del suelo (Bq-s/m <sup>3</sup> )	8.04E+05
Deposición en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	1.10E+06
Concentración en Suelo en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	2.76E+08
x/Q Dilución a nivel del suelo (s/m <sup>3</sup> )	2.34E-07
Dispersión Horizontal (m)	2.22E+03
Dispersión Vertical (m)	2.06E+03
Altura de la pluma en Línea Central (m)	1.23E+02
Tiempo de arribo de la Pluma (s)	1.73E+04

Tabla 29 Resultados Pluma 11.27-16.02 km

Pluma 1 I-131 [16.09,20.92](km)	Media
Concentración en Aire Línea Central (Bq-s/m <sup>3</sup> )	5.35E+05
Concentración en Aire a nivel del suelo (Bq-s/m <sup>3</sup> )	3.40E+05
Deposición en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	4.53E+05
Concentración en Suelo en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	1.23E+08
x/Q Dilución a nivel del suelo (s/m <sup>3</sup> )	1.15E-07
Dispersión Horizontal (m)	2.84E+03
Dispersión Vertical (m)	2.09E+03
Altura de la pluma en Línea Central (m)	1.23E+02
Tiempo de arribo de la Pluma (s)	1.83E+04

Tabla 30 Resultados Pluma 16.09-20.92 km

Pluma 1 I-131 [25.8, 32.2] (km)	Media
Concentración en Aire Línea Central (Bq-s/m <sup>3</sup> )	7.01E+04
Concentración en Aire a nivel del suelo (Bq-s/m <sup>3</sup> )	5.92E+04
Deposición en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	7.11E+04
Concentración en Suelo en Línea Central (Bq/m <sup>2</sup> )	2.41E+07
x/Q Dilución a nivel del suelo (s/m <sup>3</sup> )	5.08E-08
Dispersión Horizontal (m)	4.13E+03
Dispersión Vertical (m)	2.15E+03

<b>Altura de la pluma en Línea Central (m)</b>	1.23E+02
<b>Tiempo de arribo de la Pluma (s)</b>	2.04E+04

**Tabla 31 Resultados Pluma 25.8-32.2 km**

<b>Pluma 1 I-131 [48.3, 64.4] (km)</b>	<b>Media</b>
<b>Concentración en Aire Línea Central (Bq-s/m<sup>3</sup>)</b>	7.87E+02
<b>Concentración en Aire a nivel del suelo (Bq-s/m<sup>3</sup>)</b>	7.90E+02
<b>Deposición en Línea Central (Bq/m<sup>2</sup>)</b>	7.15E+02
<b>Concentración en Suelo en Línea Central (Bq/m<sup>2</sup>)</b>	5.01E+05
<b>x/Q Dilución a nivel del suelo (s/m<sup>3</sup>)</b>	1.81E-08
<b>Dispersión Horizontal (m)</b>	7.30E+03
<b>Dispersión Vertical (m)</b>	2.25E+03
<b>Altura de la pluma en Línea Central (m)</b>	1.23E+02
<b>Tiempo de arribo de la Pluma (s)</b>	2.59E+04

**Tabla 32 Resultados Pluma 48.3-64.4 km**

<b>Pluma 1 I-131 [64.37,80.47] (km)</b>	<b>Media</b>
<b>Concentración en Aire Línea Central (Bq-s/m<sup>3</sup>)</b>	5.48E+01
<b>Concentración en Aire a nivel del suelo (Bq-s/m<sup>3</sup>)</b>	5.50E+01
<b>Deposición en Línea Central (Bq/m<sup>2</sup>)</b>	5.18E+01
<b>Concentración en Suelo en Línea Central (Bq/m<sup>2</sup>)</b>	5.60E+04
<b>x/Q Dilución a nivel del suelo (s/m<sup>3</sup>)</b>	1.26E-08
<b>Dispersión Horizontal (m)</b>	9.10E+03
<b>Dispersión Vertical (m)</b>	2.29E+03
<b>Altura de la pluma en Línea Central (m)</b>	1.23E+02
<b>Tiempo de arribo de la Pluma (s)</b>	2.91E+04

**Tabla 33 Resultados Pluma 64.37-80.47 km**

El yodo se inhala y se acumula en la glándula tiroides. Una concentración de más de 8.2E+06 Bqs/m<sup>3</sup> causaría una dosis tiroidea de 10 mSv en niños de 5 años. Este nivel de concentración en aire a nivel del suelo es alcanzado a una distancia de 10 km de la fuente. En Europa este es el nivel para el uso de profilaxis con tabletas de yodo.

Una concentración media del suelo mayor a 185 kBq/m<sup>2</sup> puede conducir a la superación del límite de dosis umbral para el público de 1mSv/año, una concentración de 555 kBq/m<sup>2</sup> conduce al reasentamiento de la población, mientras que una concentración superior a 1480 kBq/m<sup>2</sup> la población debe ser reubicada inmediatamente.

El primer valor es alcanzado dentro de 20.92 km más allá de la fuente. Mientras que el valor límite para el reasentamiento de la población es superado dentro de 16 km, la reubicación inmediata de la población es necesaria dentro de los primeros 8 km de distancia de la fuente con una concentración en suelo de (1.06E+07 Bq/m<sup>2</sup>).

## 4.14. ESCENARIOS DE EMERGENCIA PARA EL MÓDULO EARLY

El módulo EARLY tiene la capacidad para combinar resultados de hasta tres diferentes escenarios de respuesta de emergencia.

Si más de un escenario de respuesta de emergencia en EARLY está siendo ejecutado, estos resultados se combinan de acuerdo con las fracciones de ponderación proporcionadas por el usuario en el archivo de entrada de EARLY y la suma ponderada se combina con el resultado CHRONC para producir un resultado global. Cuando los resultados se combinan, el listado producido por el módulo OUTPUT presentará la combinación general de resultados, así como cada uno de los componentes de los que es construido.

## 4.15. CÁLCULO DE DOSIS

El cálculo de dosis de radiación debido a exposición temprana, considera cinco vías: (1) exposición directa interna a material radiactivo de la pluma (cloudshine), (2) exposición por inhalación de radionúclidos en la nube, (3) exposición a material radiactivo depositado en el suelo (groundshine), (4) inhalación de material resuspendido y (5) dosis proveniente del material depositado en la piel.

En general, la ecuación de dosis para una vía de exposición temprana en MACCS en un elemento espacial dado es el producto de las siguientes:

- Concentración de radionúclidos, factor de conversión de dosis, duración de la exposición y factor de protección utilizado.

Las cantidades usadas en ecuaciones de dosis dependen de la vía de exposición. Por ejemplo, para la vía de exposición por inhalación de la nube, estas cantidades son la concentración de aire a nivel del suelo en un elemento espacial, la conversión del factor de dosis de inhalación, duración de la exposición y factor de protección por inhalación.

La opción de dosis dependiente de la dirección permite el cálculo de la dosis dependiente de la dirección del percentil 99.5 como se define en **Guía Reguladora 1.145 (NRC 1983) y Snell y Jubach (1981)**. Las dosis dependientes de la dirección pueden ser de gran interés en las instalaciones donde la distancia al sitio límite varía significativamente con la dirección desde el punto de liberación, o cuando la base de los cálculos utiliza la dosis independiente del 95% de la dirección y la dosis 99.5% dependiente de la dirección según lo estipulado en la **Orden 6430.1A del DOE**.

La deposición seca se modela usando el método de reducción de fuente. Este método hace uso de la suposición, donde la deposición en el suelo no afecta



la distribución vertical del material. Es decir, la pluma siempre mantiene una distribución gaussiana. La concentración de material en cualquier punto del suelo es producto de la concentración de aire integrada a nivel del suelo por la velocidad de deposición. El material en cada grupo de elementos se puede distribuir entre varios grupos de tamaños de partículas, con cada grupo de elementos teniendo una diferente distribución de material entre los grupos de tamaño de partícula. Todos los segmentos de pluma tendrán la misma distribución de tamaños de partícula en el momento de su liberación, pero esta distribución puede cambiar con el tiempo, ya que, las plumas viajan a favor del viento.

#### 4.16. EXPOSICIÓN Y EVACUACIÓN

La duración de la exposición depende de la vía de exposición y la respuesta a la emergencia en un elemento espacial y se calcula en función de los datos proporcionados por el usuario. El factor de protección es una cantidad sin unidades usada para reducir la dosis de radiación como resultado de las acciones de protección proporcionadas para una vía de exposición dada.

Se deben incluir los factores de protección para las diversas vías de exposición (*cloudshine*, inhalación, *groundshine* y dosis en piel) y para tres diferentes grupos de personas (evacuación, personas haciendo actividades normales y personas que se refugian).

El modelo de evacuación MACCS incorpora un tiempo de retraso antes del movimiento de la población, seguido de una evacuación radial alejada de la instalación a una velocidad constante radial efectiva. Diferentes factores de protección y tasas de respiración se pueden utilizar mientras las personas esperan la evacuación o están siendo evacuadas.

El módulo EARLY de MACCS acumula las dosis de radiación para las personas evacuadas agregando la dosis que recibieron antes de que comenzaran a moverse y la dosis recibida durante la evacuación. Tres valores de velocidad así definidos son usados para fases inicial, media y tardía de la evacuación.

Se supone que la longitud de la nube permanece constante después de la liberación (es decir, el anverso y reverso de la pluma viajan a la misma velocidad) y que la concentración de material radiactivo es uniforme a lo largo de la nube.

Esta sección define los factores de protección para la exposición a *cloudshine*, *groundshine*, inhalación y deposición en piel para tres tipos de actividades (actividad normal, evacuación y refugio). También se especifica una frecuencia respiratoria para cada tipo de actividad. Además, los parámetros de resuspensión son usados para el tiempo del periodo de emergencia (EARLY), el coeficiente y vida media de resuspensión también se definen.

Algunos de los valores de los parámetros definidos se utilizan tanto en EARLY como en CHRONC; estos son: (1) *groundshine* en actividad normal (2) factores de protección de inhalación (3) velocidad de respiración normal.

El módulo CHRONC no calcula los efectos resultantes de la exposición directa a la nube radiactiva, por lo tanto, no hace uso de los factores *cloudshine* y deposición. Los parámetros de resuspensión a largo plazo son definidos en base a los datos suministrados en CHRONC.

#### 4.17.1. ESCENARIOS DE RESPUESTA A EMERGENCIA: EARLY

El usuario puede identificar múltiples escenarios, cada uno representa un segmento de la población que tiene características de respuesta diferentes a otros.

Las acciones de evacuación y reubicación pueden modelarse en la región rodeando el punto de liberación, fuera de la zona de evacuación y protección, las acciones de reubicación dependientes de la dosis pueden tener lugar de acuerdo con los criterios de dosis, la reubicación ocurre cuando la dosis proyectada excede el nivel de acción basado en períodos de proyección de dosis y órganos críticos para el escenario. Las proyecciones de dosis para la reubicación podrían evaluarse usando códigos de computadora o mediciones de campo.

	EVACUACIÓN	REUBICACIÓN
¿Qué desencadena esta acción de protección?	Con respecto a la alarma externa o el tiempo de arribo de la primera pluma en el punto central del intervalo espacial	Cuando la dosis total comprometida para un individuo en un elemento espacial excede el umbral de dosis especificado para el órgano elegido.
¿Cuándo es aplicable la acción de protección?	Solamente durante la fase de emergencia	Durante fase intermedia y de emergencia.
¿Dónde es aplicable la acción de protección?	Aplicado a personas que residen en la zona de refugio y evacuación	A todos los no evacuados fuera de la región de refugio y evacuación
¿Qué información se requiere para definir la acción de protección?	Duración de la fase de evacuación, la velocidad de transporte y dirección de la pluma, retrasos de respuesta y factores de protección.	Definido por el tiempo de demora la reubicación después de arribo de la pluma, umbral de dosis a un órgano crítico, duración de la fase de emergencia y factor de protección
¿Cómo se mueve la población?	Ruta de evacuación radial o en forma de red	Movimiento instantáneo fuera de la red espacial
¿Qué opciones de modelado están disponibles?	La evacuación se puede modelar como radial o en red dónde hay retrasos en la respuesta, velocidades y duraciones de viaje con el fin de aproximar el movimiento de los residentes de la zona de refugio y evacuación a lugares seguros.	Se puede modelar como una reubicación temporal normal o Hot-spot con el concepto de que un segmento de la población susceptible a una mayor exposición será reubicado con mayor urgencia, depende de la disponibilidad de los servicios de emergencia.

**Tabla 34 Evacuación vs Reubicación**

La mayoría de los países implementa una guía nacional o internacional sobre los niveles de dosis aceptables durante una emergencia:

- Órgano crítico (generalmente “efectivo”)
- Periodo de Proyección de Dosis (4 días)
- Nivel de Dosis (1 a 5 rem en los EE.UU.)

La región de evacuación y protección es especificada por el usuario para extender una distancia radial dada (es decir, un intervalo espacial radial), la evacuación de la población cerca del sitio es la primera prioridad. Para cada distancia radial en esta región, el usuario especifica un período de protección (puede tener duración de cero) que ocurre antes del inicio de la evacuación.

Al permitir diferentes tiempos de arribo de acuerdo a cada distancia espacial, se puede modelar una evacuación escalonada en la cual el tiempo de demora de la evacuación aumenta en función de la distancia.

Cada escenario de respuesta puede utilizar su propio conjunto de factores de protección. Al terminar la fase de protección, los individuos residentes comienzan su viaje fuera de la región. En cada uno de los escenarios el usuario define si la evacuación debe seguir rutas radiales o seguir rutas complejas.

Mientras que los requisitos de planificación de emergencias de la NRC requieren un alto nivel de preparación en las 10 millas (16 km) de la zona de planificación de emergencia, es posible que algunos subgrupos de población pueden quedarse atrás, requiriendo pasos por parte de las autoridades locales para ubicarlos y brindar la asistencia necesaria para salir de las áreas contaminadas. En el borrador público de NUREG-1150, se supuso que el 95% de la población evacuaría al recibir la notificación para hacerlo y 5% de la población se quedaría atrás, con la población restante de áreas contaminadas sujetas a reubicación después de 12 a 24 horas de exposición, dependiendo de las dosis incurridas.

Un ejemplo de esto se basa en la suposición de que para la población dentro de 10 millas de la planta habría dos escenarios de respuesta a la emergencia: evacuación en un momento específico después del inicio del accidente y reubicación dependiente de la dosis. Por lo tanto, incorpora dos escenarios para los cálculos EARLY. Las dos respuestas a escenarios de emergencia se combinan utilizando fracciones de ponderación de “fracción de personas” 0,95 y 0,05. La ponderación de fracción de personas significa que los respectivos valores de consecuencia de los dos escenarios se ponderan con la fracción de ponderación correspondiente. Para cada prueba climática y cada dirección del viento, el resultado global es calculado sumando dos valores: (1) 95% del valor de la consecuencia calculado para el escenario de evacuación 1 y (2) 5% del valor de la consecuencia calculado para la reubicación (escenario 2).

#### 4.17.2. CÁLCULO DE DOSIS PARA POBLACIONES EVACUADAS Y REUBICADAS

Se calcula el tiempo de arribo a cada elemento espacial. Los tiempos para cada nodo son en función de la velocidad del viento y la distancia. La dosis recibida por las personas que se mueven dentro de la red de evacuación se calcula mediante el seguimiento de rutas que comienza en un nodo raíz. Cada nodo raíz es el punto de partida de una red, que finaliza cuando los individuos en esa vía salen de la red, alcanzando una distancia mayor que el límite exterior de la región que recorren los refugiados y evacuados. Los cálculos para un nodo raíz comienzan con un cálculo de la dosis recibida por los residentes en el punto de partida.

La fase de emergencia comienza con el evento iniciador y termina cuando:

El transporte de la pluma es completado y la evacuación y reubicación también son completados, la duración típica es de una semana, pero puede ser más corta o larga dependiendo del escenario.

Parámetros considerados para el cálculo de dosis:

- Velocidad de evacuación durante las 3 fases de evacuación: inicial, media y tardía
- Número de elementos espaciales radiales (es decir, anillos contiguos) que comprenden, la región de protección y evacuación
- Límite exterior de la región que recorren los refugiados y evacuados.
- Regiones donde las personas están sujetas a protección y evacuación
- Tiempo entre el inicio del período de protección hasta que las personas comienzan su evacuación.
- Dirección de destino de cada elemento de la región de evacuación y protección.
- Duración del período de la fase de emergencia.
- Definición del órgano crítico para las decisiones de reubicación durante el período de emergencia considerado por EARLY
- Para determinar si las personas pueden permanecer en la zona de reubicación, es calculada la dosis comprometida total para órganos críticos de un individuo que permaneció en el lugar durante toda la fase de emergencia.
- Definición del tiempo de acciones normales de reubicación. La reubicación normal solo puede ocurrir para personas que residen fuera de la zona de respuesta a emergencias. Es decir, las dosis a personas que esperan evacuación o protección en refugios no serán afectadas por el modelo de reubicación normal.
- Definición del umbral de dosis de reubicación de Hot-spot. Si el total de dosis comprometida para individuos fuera de las zonas de evacuación y protección

que permanecieron detenidas durante todo el período de la fase de emergencia excede este umbral, estas personas serán reubicadas (removidas).

#### 4.17. CÁLCULO DE EFECTOS TEMPRANOS

El riesgo individual de muerte temprana se modela en MACCS usando una función de dos parámetros, llamada función de riesgo. La función de riesgo se usa para sumar el riesgo acumulativo de varios tipos de daños potenciales.

El umbral de dosis es incorporado en el modelo de muerte temprana. Si la dosis para cualquiera de los órganos está por debajo del umbral especificado por el usuario, el peligro para ese órgano se establece en cero. Cuando el material radioactivo se inhala y se retiene en el sistema respiratorio, un individuo puede continuar recibiendo una dosis de radiación durante largos períodos de tiempo después de inhalar el material. Dependiendo del tamaño de partícula y la forma química, los mecanismos de eliminación pueden eliminar el material del cuerpo o transportarlo desde el sistema respiratorio a otros órganos. Por lo tanto, no tiene sentido hacer referencia a la dosis de radiación sin especificar el período de tiempo de interés.

El concepto de dosis comprometida se utiliza ampliamente en protección radiológica. Esta dosis de por vida es usada para determinar la necesidad de acciones de mitigación y para calcular cánceres y dosis en población. La implementación de los modelos de efectos de salud tempranos requiere un método de cálculo que tiene en cuenta dosis de material radiactivo inhalado y retenido en el sistema respiratorio. MACCS aplica factores de reducción de dosis a dosis prolongadas que contribuyen a los efectos de salud tempranos. Los factores de reducción de dosis se derivan de valores LD50 o D50 que se aplican a un conjunto secuencial de períodos de tiempo de longitud fija.

**Dosis Aguda Efectiva:** Se suministra solo para los órganos utilizados en el cálculo de los efectos tempranos a la salud. El período de dosis aguda comprometida por inhalación y depositado internamente es de un año.

Para la muerte de la médula ósea (con tratamiento de apoyo), Evans, Moellen y Cooper (1985) muestran valores LD50 de 4.5 Gy para el período de 0 a 1 día, 9 Gy para el período de 1 a 14 días, y 18 Gy para el período de 14 a 30 días. En lugar de calcular tres dosis diferentes de médula roja y aplicando los tres valores diferentes de LD50 para calcular el riesgo, calculamos una sola dosis de médula roja utilizando el factor de conversión de dosis aguda efectiva.

El efecto de prolongación de dosis se aplica solo a la exposición interna resultante por inhalación. La dosis de las vías de exposición directa en EARLY (*cloudshine* y *groundshine*) se suman sin que se aplique ningún factor de reducción,

incluso si la exposición duró más de 1 día. La implementación actual de los modelos de efectos de salud tempranos no distingue entre *groundshine*, *cloudshine* y dosis comprometida por inhalación de 0 a 1 día. Son considerados en este modelo para ser igualmente efectivo en causar daño.

El error atribuido a introducir la dosis completa de exposición directa al primer día es pequeño y está en la dirección de sobre estimar el riesgo. En la mayoría de los casos, los planes de emergencia deben garantizar que no se les permita a los individuos permanecer en terreno contaminado por mucho más tiempo que un día si los niveles de dosis son lo suficientemente altos como para presentar un riesgo de efectos contra la salud tempranos.

La dosis de inhalación del material resuspendido se trata como si todo el material resuspendido fuera inhalado desde el comienzo del período de exposición. La información en esta sección se usa solo para controlar el cálculo del riesgo individual.

Debido a su mayor susceptibilidad para ingresar a los seres vivos por mecanismos distintos a la inhalación, como lo puede ser por ingesta y vía cutánea, además de que los radionúclidos de Cs poseen un tiempo de vida media mayor a los radioisótopos de I, el Cesio se manifiesta como el mayor contribuyente a los riesgos para la salud de mayor interés, que son: muertes latentes por cáncer (LCF) y apariciones latentes de cáncer (fatal y no fatal).

#### 4.18. RESULTADOS GENERADOS POR EL MÓDULO EARLY

- **Total, de casos de muertes tempranas, lesiones tempranas y muertes por cáncer (dentro de un año de ocurrido el accidente)**
- **Radio de dosis máxima.** Basado en la dosis total a cada distancia para un rango de distancias, análogo a los resultados de dosis central. La dosis máxima es más general y se reporta la dosis máxima a la redonda. Este resultado es generado para cada escenario de respuesta. No depende de los datos de población. Es calculada en un punto en específico.
- **Población que excede la Dosis Umbral.** Asociada al órgano objetivo, si la dosis aguda está por debajo del umbral, no contribuirá al riesgo de muerte
- **Riesgo individual promedio de muerte temprana.** Suma de los valores de riesgo en todos los sectores a una distancia dada y dividida por el número de sectores (Probabilidad de morir dentro de un año de sucedido el accidente para una persona)
- **Dosis poblacional.** Dosis total a la población a largo plazo para un órgano, que resulta de la contaminación de una región específica (Dosis poblacional,

expresada en dosis efectivas equivalentes por exposición del cuerpo completo).

- **Distancia de máximo riesgo de muerte temprana.**
- **Dosis en cada elemento espacial.** El reporte genera el área en que se excede el nivel de concentración para un radionúclido específico. Concentraciones en suelo y exposiciones aerotransportadas a nivel del suelo para cada elemento de terreno.
  - Sobre lesiones tempranas.

El riesgo individual de cada tipo de lesión temprana se modela utilizando un enfoque análogo al utilizarlo para el cálculo de riesgo de muerte temprana. La lesión temprana difiere del modelo de mortalidad temprana en el que, en lugar de sumar el daño de más de un órgano, solo se usa uno.

Se incorpora un umbral de dosis en el modelo de lesión temprana. Si la dosis para cualquiera de los órganos está debajo del límite especificado, entonces, el riesgo de este tipo de lesión es cero. Además de los valores límites, el usuario debe especificar la fracción de la población que es susceptible a la lesión. La información se usa para controlar el cálculo de riesgo individual.

- Factor de riesgo de muertes latentes por cáncer.

Tiene las unidades riesgo/sievert, mientras que, para calcular el riesgo colectivo de exposiciones de ingestión y descontaminación, tiene las unidades casos/persona-sievert.

- Factor de riesgo de cáncer latente.

Este parámetro tiene las unidades riesgo/sievert, mientras que, para calcular el riesgo colectivo de ingestión y descontaminación, tiene las unidades casos/persona-sievert.

Para el Cálculo de Muertes tempranas, MACCS usa una dosis LD50 predeterminada (la dosis asociada con un 50% de probabilidad de muerte) de 380 rem (3.8 Sv).

La etiqueta "TOT LIF" se usa para especificar la dosis total de todas las vías de exposición. MACCS automáticamente proporciona la media, el percentil 50, 90, 95, 99 y 99.5, además de los valores máximos.

Usando el modelo LNT (Lineal No Threshold), el mayor contribuidor al riesgo de LCF (Latent Cancer Fatalities) para más escenarios es el riesgo a largo plazo después de la fase de emergencia y este riesgo es controlado por el criterio de habitabilidad.



Esto significa que incrementar el número de segmentos de pluma tiene un pequeño efecto en el cálculo de riesgo de LCF usando el modelo LNT. Habría un efecto más grande en el riesgo de LCF usando los modelos dosis-respuesta.

#### 4.19. RESULTADOS GLOBALES DEL MÓDULO “EARLY”

*Para el módulo EARLY se propusieron dos escenarios de respuesta a la emergencia: evacuación en un momento específico después del inicio del accidente y reubicación dependiente de la dosis.*

Las dos respuestas a escenarios de emergencia se combinan utilizando fracciones de ponderación de “fracción de personas”.

La combinación se desarrollaría de acuerdo con la suposición en el borrador público de NUREG-1150, donde el 95% de la población evacuaría al recibir la notificación para hacerlo y 5% de la población se quedaría atrás.

El resultado global para cada combinación de respuestas es calculado sumando los dos valores. El 95% del valor de la consecuencia calculado para el escenario de evacuación 1 y el 5% del valor de la consecuencia calculado para la reubicación (escenario 2).

Se enlistan los resultados para efectos tempranos en la salud y para equivalente de dosis total, a partir de 2 km de distancia de la fuente, ya que, aproximadamente hasta 2 km nos encontramos dentro de los límites de la planta. Por lo cual, más allá de esta distancia podrán contabilizarse los efectos a la salud para el público y el equivalente de dosis efectivo comprometido que recibe.

A continuación, se presentan los resultados para efectos tempranos a la salud y riesgo poblacional e individual para un accidente donde se libera (1) más de la mitad del inventario del núcleo de yodo, un tercio de Cesio y Telurio, el cual es propuesto como el accidente “Máximo Creíble” con una probabilidad de ocurrencia excesivamente pequeña, tomado del “Documento de Información Técnica 14844”

También se presentan los resultados para:

- (2) Liberación superior al 10% del inventario inicial de Cs-I (15% Alta) INES 7- 3.51E+16 de I-131 Eq.
- (3) Liberación superior al 1% e inferior al 10% y (5% Media) INES 7- 2.34E+16 de I-131 Eq.
- (4) Liberación inferior al 1% (Baja) INES 6- 2.34E+15 de I-131 Eq.

Correspondientes al término fuente resultante de las secuencias que más contribuyen a la frecuencia de daño al núcleo tomadas de la “Actualización del Examen Individual de Planta Nivel 2 de la Central Laguna Verde U-1”

Los resultados presentados para cada inventario de liberación, incluyen:



Dosis comprometida Máxima Individual para Tiroides y Cuerpo completo, Concentración a nivel del suelo de I-131, # de muertes tempranas y de Muertes Latentes por cáncer, además de Factores de Riesgo Individuales y poblacionales de muerte temprana y de desarrollo de cáncer fatal y no fatal. Estos factores de riesgo son condicionales por cada sievert al cual un individuo o la población están expuestos, por ello, el factor riesgo individual se define como riesgo/sievert y el poblacional en casos/persona-sievert.

#### 4.20.1. RESULTADOS ACCIDENTE MÁXIMO CREÍBLE (50 % I, 33 % Cs)

ACCIDENTE MÁXIMO CREÍBLE										
Distancia (km)	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer de Tiroides	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer	Dosis Comprometida Máxima Individual CUERPO COMPLETO (Sv)	Dosis Comprometida Máxima Individual TIROIDES (Sv)	Conc. a nivel del suelo (Bqs/m <sup>3</sup> )	Distancia (km)	Casos Muertes Tempranas	Casos Muertes Latentes por cáncer	Factor de Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer	Factor de Riesgo Poblacional Muerte Temprana
<b>3.2-4.0</b>	8.81E-05	1.81E-03	0.637	2.36	5.21E+07	<b>0.5-8.1</b>	7.86	15.8	8.27E-04	2.04E-04
<b>8.1-11.3</b>	3.14E-05	6.59E-04	0.128	0.46	6.18E+06	<b>0.5-16.1</b>	8.18	27.9	4.38E-04	9.96E-05
<b>16.1-20.9</b>	7.02E-06	1.96E-04	0.091	0.25	3.40E+05	<b>0.5-20.9</b>	8.21	47.3	3.39E-04	5.88E-05
<b>25.8-32.2</b>	2.11E-06	5.36E-05	0.034	0.09	5.92E+04	<b>0.5-32.2</b>	8.21	62.1	1.87E-04	2.48E-05
<b>48.3-64.4</b>	2.51E-07	5.41E-06	0.0054	0.015	7.90E+02	<b>0.5-64.4</b>	8.21	7.22	5.44E-05	6.19E-06
<b>64.4-80.5</b>	4.80E-08	1.27E-06	0.0015	0.003	5.50E+01	<b>0.5-80.5</b>	8.21	7.31	3.53E-05	3.96E-06

Tabla 35 Resultados Accidente Máximo Creíble

#### 4.20.2. RESULTADOS LIBERACIÓN SUPERIOR AL 10% DEL INVENTARIO INICIAL DE Cs-I (15%)

LIBERACIÓN SUPERIOR AL 10% DEL INVENTARIO INICIAL										
Distancia (km)	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer de Tiroides	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer	Dosis Comprometida Máxima Individual CUERPO COMPLETO (Sv)	Dosis Comprometida Máxima Individual TIROIDES (Sv)	Conc. a nivel del suelo (Bqs/m <sup>3</sup> )	Distancia (km)	Casos Muertes Tempranas	Casos Muertes Latentes por cáncer	Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer	Riesgo Poblacional de Muerte Temprana
<b>3.2-4.0</b>	3.03E-05	4.96E-04	2.13E-01	7.88E-01	1.74E+07	<b>0.5-8.1</b>	1.49E+00	6.02E+00	2.72E-04	3.71E-05
<b>8.1-11.3</b>	1.07E-05	1.91E-04	4.36E-02	1.58E-01	2.07E+06	<b>0.5-16.1</b>	1.49E+00	9.43E+00	1.45E-04	1.81E-05
<b>16.1-20.9</b>	3.44E-06	8.70E-05	4.34E-02	1.19E-01	1.13E+05	<b>0.5-20.9</b>	1.49E+00	1.69E+01	1.21E-04	1.07E-05
<b>25.8-32.2</b>	1.10E-06	2.51E-05	1.76E-02	5.00E-02	1.98E+04	<b>0.5-32.2</b>	1.49E+00	2.31E+01	6.97E-05	4.50E-06
<b>48.3-64.4</b>	8.39E-08	1.80E-06	1.83E-03	5.00E-03	2.64E+02	<b>0.5-64.4</b>	1.49E+00	2.81E+01	2.11E-05	1.13E-06
<b>64.4-80.5</b>	1.60E-08	4.23E-07	5.28E-04	1.12E-03	1.84E+01	<b>0.5-80.5</b>	1.49E+00	2.84E+01	1.37E-05	7.20E-07

Tabla 36 Resultados Liberación Superior al 10%

#### 4.20.3. RESULTADOS LIBERACIÓN SUPERIOR AL 1% E INFERIOR AL 10% (5%)

LIBERACIÓN SUPERIOR AL 1% E INFERIOR AL 10%										
Distancia (km)	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer de Tiroides	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer	Dosis Comprometida Máxima Individual CUERPO COMPLETO (Sv)	Dosis Comprometida Máxima Individual TIROIDES (Sv)	Conc. a nivel del suelo (Bqs/m <sup>3</sup> )	Distancia (km)	Casos Muertes Tempranas	Casos Muertes Latentes por cáncer	Factor de Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer	Factor de Riesgo Poblacional Muerte Temprana
3.2-4.0	1.53E-05	2.31E-04	1.08E-01	3.95E-01	8.68E+06	0.5-8.1	3.41E-01	3.06E+00	1.33E-04	8.47E-06
8.1-11.3	5.46E-06	8.06E-05	2.29E-02	8.14E-02	1.03E+06	0.5-16.1	3.41E-01	4.53E+00	7.16E-05	4.13E-06
16.1-20.9	2.15E-06	5.01E-05	2.62E-02	7.29E-02	5.66E+04	0.5-20.9	3.41E-01	8.78E+00	6.28E-05	2.44E-06
25.8-32.2	7.35E-07	1.61E-05	1.18E-02	3.50E-02	9.86E+03	0.5-32.2	3.41E-01	1.27E+01	3.84E-05	1.03E-06
48.3-64.4	4.19E-08	9.02E-07	9.13E-04	2.50E-03	1.32E+02	0.5-64.4	3.41E-01	1.53E+01	1.15E-05	2.57E-07
64.4-80.5	8.00E-09	2.11E-07	2.64E-04	5.61E-04	9.16E+00	0.5-80.5	3.41E-01	1.54E+01	7.43E-06	1.64E-07

Tabla 37 Liberación Superior al 1%

#### 4.20.4. RESULTADOS LIBERACIÓN INFERIOR AL 1%

LIBERACIÓN INFERIOR AL 1%										
Distancia (km)	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer de Tiroides	Factor de Riesgo Individual Desarrollar Cáncer Fatal	Dosis Comprometida Máxima Individual CUERPO COMPLETO (Sv)	Dosis Comprometida Máxima Individual TIROIDES (Sv)	Conc. a nivel del suelo (Bqs/m <sup>3</sup> )	Distancia (km)	Casos Muertes Tempranas	Casos Muertes Latentes por cáncer	Factor de Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer	Factor de Riesgo Poblacional Muerte Temprana
3.2-4.0	1.48E-05	6.58E-05	4.98E-02	7.69E-01	3.56E+07	0.5-8.1	0.00E+00	7.36E-01	3.21E-05	0.00E+00
8.1-11.3	3.40E-06	1.85E-05	5.00E-03	5.38E-02	3.57E+06	0.5-16.1	0.00E+00	1.29E+00	1.79E-05	0.00E+00
16.1-20.9	1.16E-06	2.02E-05	1.06E-02	3.98E-02	3.12E+05	0.5-20.9	0.00E+00	2.64E+00	1.89E-05	0.00E+00
25.8-32.2	2.98E-07	5.10E-06	3.09E-03	1.17E-02	7.51E+04	0.5-32.2	0.00E+00	3.99E+00	1.20E-05	0.00E+00
48.3-64.4	1.64E-08	2.75E-07	2.08E-04	7.82E-04	4.41E+03	0.5-64.4	0.00E+00	4.77E+00	3.59E-06	0.00E+00
64.4-80.5	3.36E-09	5.76E-08	4.97E-05	1.75E-04	8.66E+02	0.5-80.5	0.00E+00	4.81E+00	2.32E-06	0.00E+00

Tabla 38 Resultados Liberación inferior al 1%

## 4.20. ANÁLISIS DE RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL MÓDULO EARLY PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE INVENTARIO LIBERADO

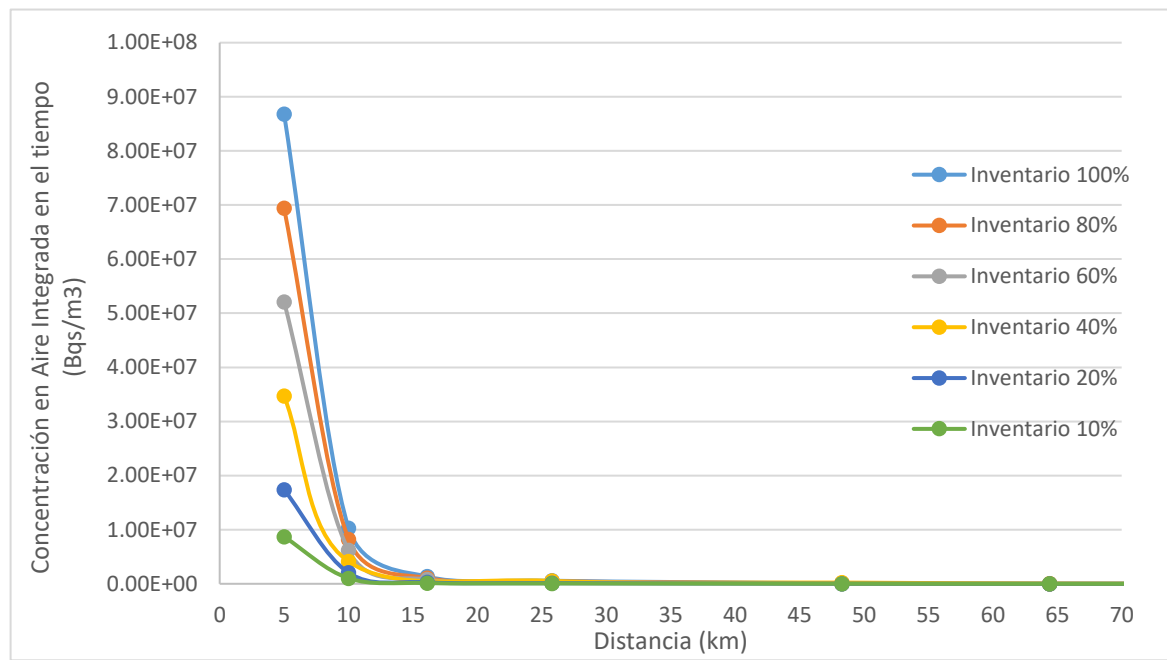
Se presenta el siguiente análisis para observar el comportamiento de las variables: concentración en aire integrada en el tiempo, dosis máxima individual (cuerpo completo), muertes latentes por cáncer, riesgo poblacional de desarrollar cáncer, dosis máxima individual (tiroides) y riesgo individual de desarrollar cáncer de tiroides para contestar al siguiente planteamiento:

- ¿Cómo se relaciona el % de inventario liberado y el número de muertes tempranas y muertes latentes por cáncer?

Se analizan los resultados para el 100, 80, 60, 40, 20 y 10% del inventario inicial del núcleo en una liberación hipotética hacia la atmósfera y encontrar una relación o comportamiento que permita predecir los resultados para estas variables sin necesidad de realizarse la simulación.

Distancia (km)	Concentración en Aire Integrada en el tiempo (Bqs/m <sup>3</sup> )					
	100%	80%	60%	40%	20%	10%
5	8.68E+07	6.94E+07	5.21E+07	3.47E+07	1.74E+07	8.68E+06
10	1.03E+07	8.24E+06	6.18E+06	4.12E+06	2.07E+06	1.03E+06
16.1	1.34E+06	1.07E+06	8.04E+05	5.35E+05	2.68E+05	1.34E+05
25.8	5.66E+05	4.53E+05	3.40E+05	2.26E+05	1.13E+05	5.66E+04
48.3	9.86E+04	7.89E+04	5.92E+04	3.94E+04	1.98E+04	9.86E+03
64.4	1.32E+03	1.05E+03	7.90E+02	5.26E+02	2.64E+02	1.32E+02
80.5	9.16E+01	7.32E+01	5.50E+01	3.66E+01	1.84E+01	9.16E+00

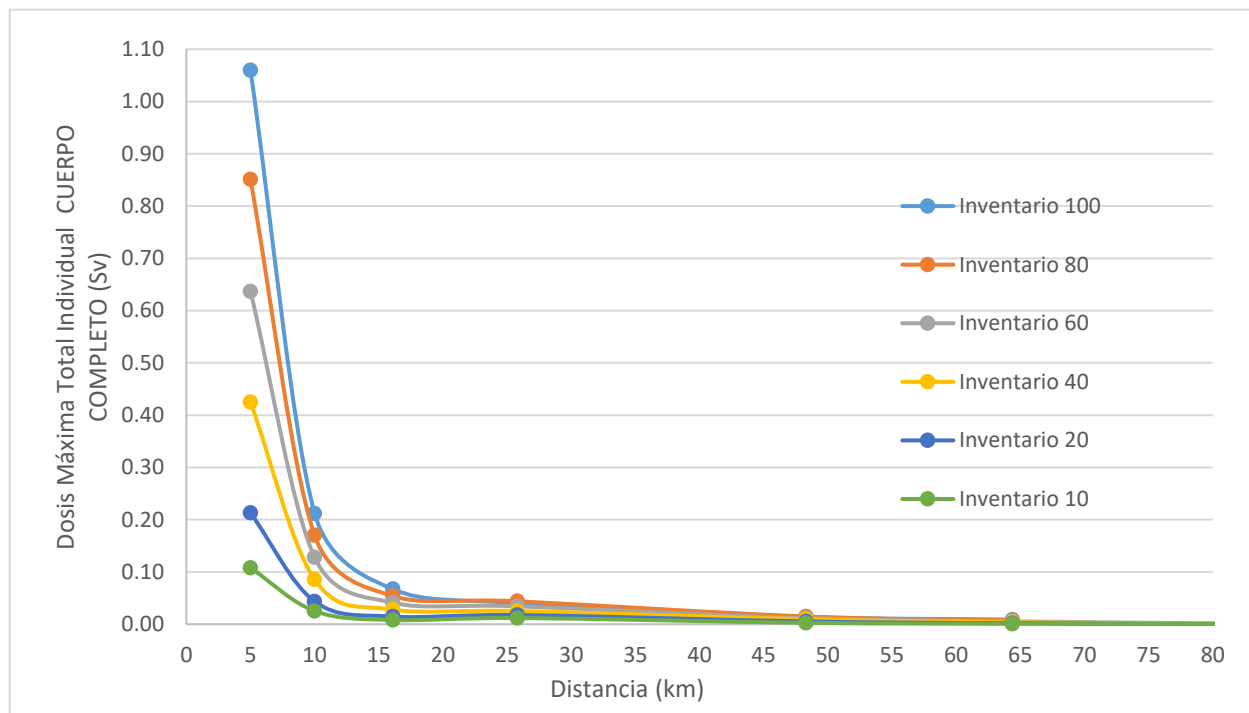
Tabla 39 Concentración en Aire Integrada en el tiempo (% de Inventario Liberado)



**Gráfico 9 Concentración en Aire Integrada en el tiempo vs Distancia**

Distancia (km)	Dosis Máxima Individual Cuerpo Completo (Sv)					
	100%	80%	60%	40%	20%	10%
5	1.06E+00	8.51E-01	6.37E-01	4.25E-01	2.13E-01	1.08E-01
10	2.12E-01	1.70E-01	1.28E-01	8.57E-02	4.36E-02	2.53E-02
16.1	6.72E-02	5.41E-02	4.11E-02	2.79E-02	1.46E-02	7.96E-03
25.8	4.03E-02	4.39E-02	3.43E-02	2.53E-02	1.76E-02	1.18E-02
48.3	1.41E-02	1.47E-02	1.14E-02	9.60E-03	5.31E-03	2.66E-03
64.4	8.80E-03	7.31E-03	5.48E-03	3.65E-03	1.83E-03	9.13E-04
80.5	2.64E-03	2.12E-03	1.58E-03	1.06E-03	5.28E-04	2.64E-04

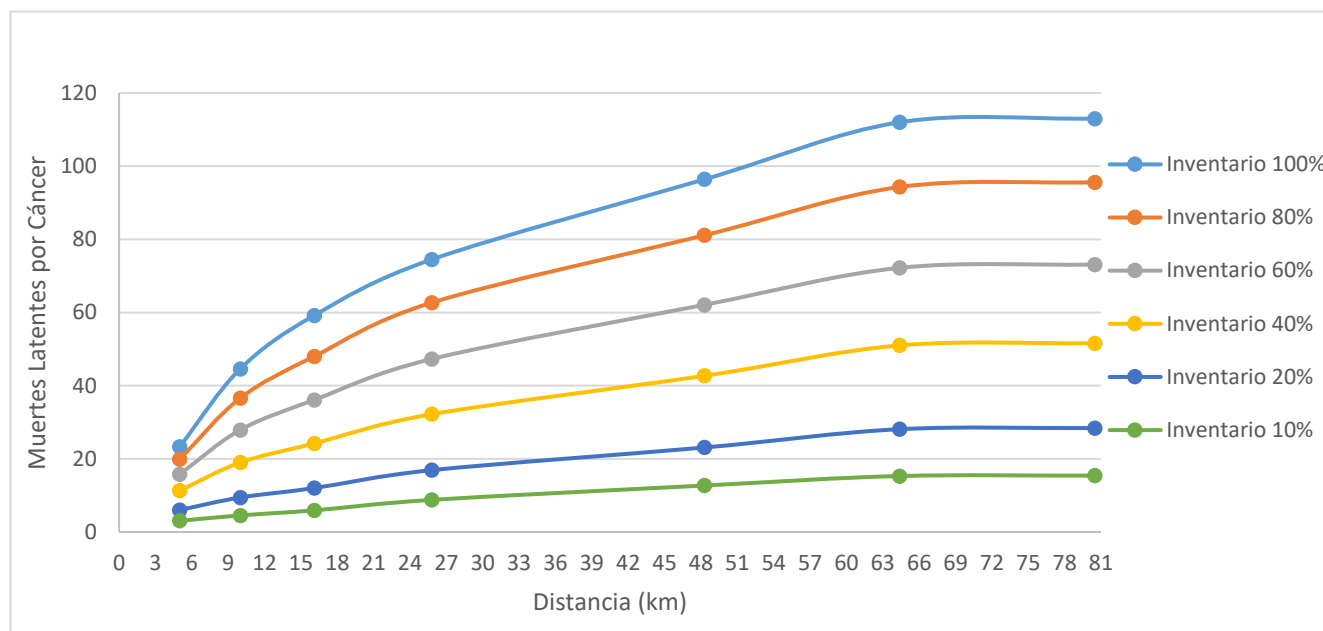
**Tabla 40 Dosis Máxima Individual Cuerpo Completo (% de inventario Liberado)**



**Gráfico 10 Dosis Máxima Individual Cuerpo Completo vs Distancia**

Distancia (km)	Muertes Latentes por cáncer					
	100%	80%	60%	40%	20%	10%
5	2.33E+01	1.99E+01	1.58E+01	1.13E+01	6.02E+00	3.06E+00
10	4.46E+01	3.66E+01	2.79E+01	1.90E+01	9.43E+00	4.53E+00
16.1	5.92E+01	4.80E+01	3.61E+01	2.42E+01	1.20E+01	5.91E+00
25.8	7.45E+01	6.27E+01	4.73E+01	3.22E+01	1.69E+01	8.78E+00
48.3	9.64E+01	8.11E+01	6.21E+01	4.27E+01	2.31E+01	1.27E+01
64.4	1.12E+02	9.43E+01	7.22E+01	5.10E+01	2.81E+01	1.53E+01
80.5	1.13E+02	9.56E+01	7.31E+01	5.16E+01	2.84E+01	1.54E+01

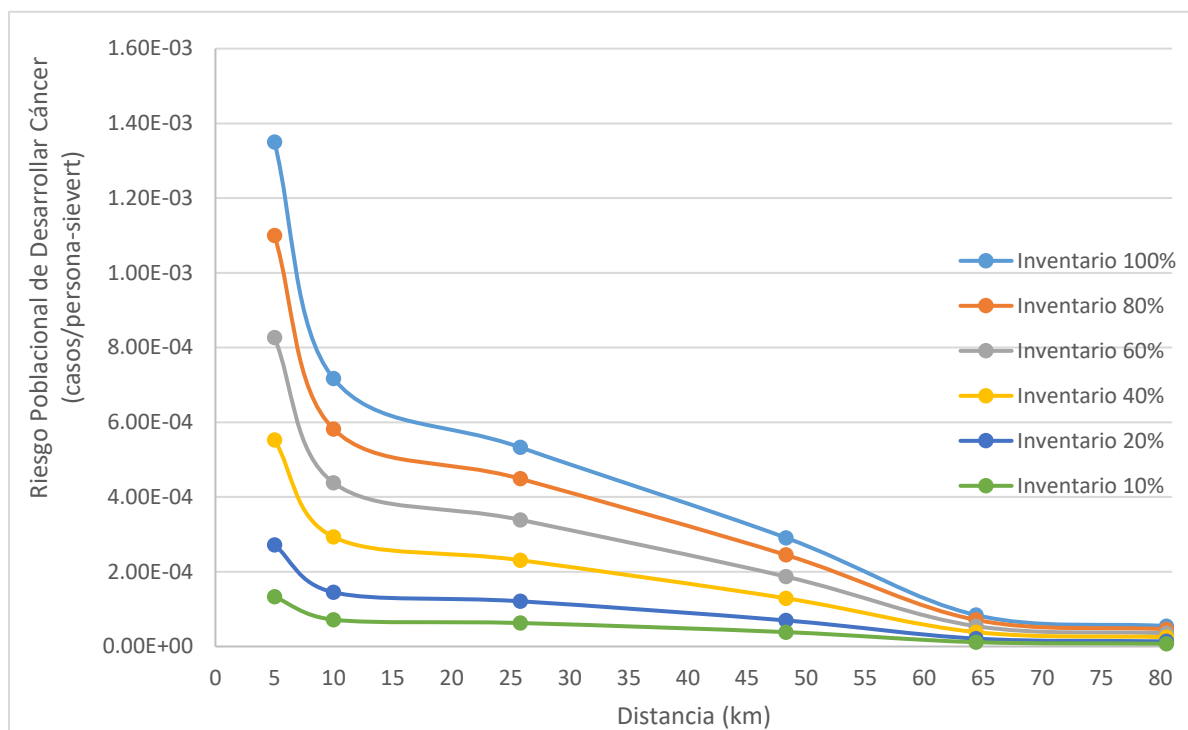
**Tabla 41 Muertes Latentes por cáncer (% de Inventario Liberado)**



**Gráfico 11 Muertes Latentes por Cáncer vs Distancia**

Distancia (km)	Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer (casos/persona-sievert)					
	100%	80%	60%	40%	20%	10%
5	1.35E-03	1.10E-03	8.27E-04	5.53E-04	2.72E-04	1.33E-04
10	7.17E-04	5.82E-04	4.38E-04	2.93E-04	1.45E-04	7.16E-05
25.8	5.33E-04	4.49E-04	3.39E-04	2.31E-04	1.21E-04	6.28E-05
48.3	2.91E-04	2.45E-04	1.87E-04	1.29E-04	6.97E-05	3.84E-05
64.4	8.41E-05	7.11E-05	5.44E-05	3.84E-05	2.11E-05	1.15E-05
80.5	5.46E-05	4.61E-05	3.53E-05	2.49E-05	1.37E-05	7.43E-06

**Tabla 42 Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer (% de Inventario Liberado)**

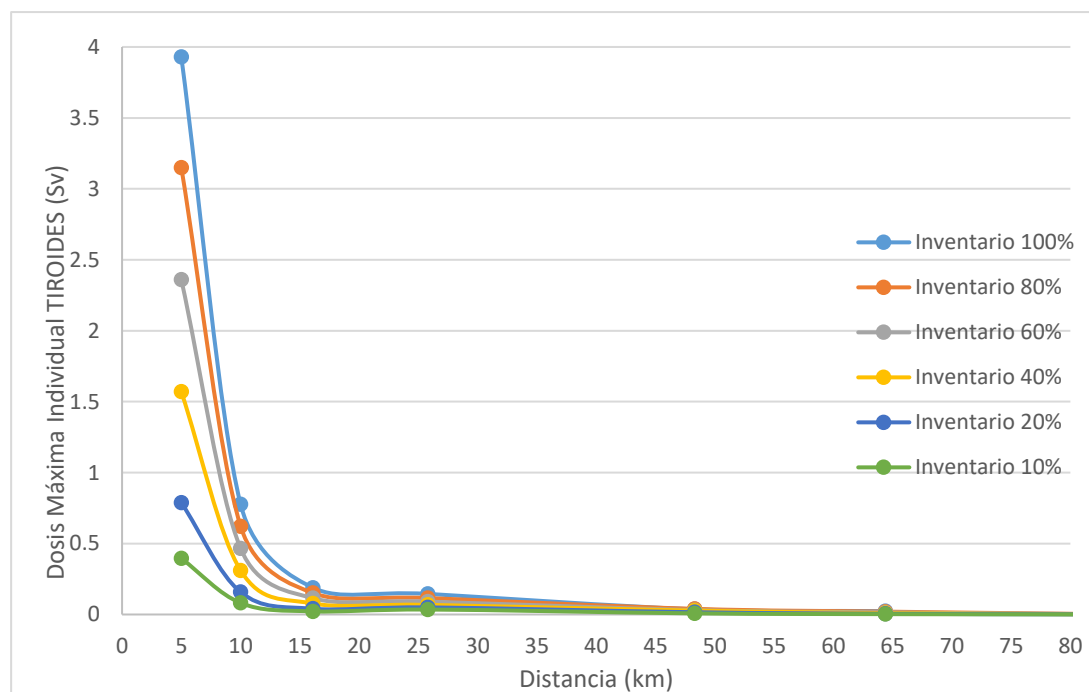


**Gráfico 12 Riesgo Poblacional de desarrollar Cáncer vs Distancia**

Distancia (km)	Dosis Máxima Individual TIROIDES (Sv)					
	100%	80%	60%	40%	20%	10%
5	3.93E+00	3.15E+00	2.36E+00	1.57E+00	7.88E-01	3.95E-01
10	7.77E-01	6.22E-01	4.66E-01	3.11E-01	1.58E-01	8.14E-02
16.1	1.89E-01	1.52E-01	1.15E-01	7.76E-02	4.04E-02	2.20E-02
25.8	1.45E-01	1.16E-01	9.07E-02	6.78E-02	5.00E-02	3.50E-02
48.3	3.64E-02	3.97E-02	3.12E-02	2.77E-02	1.57E-02	7.82E-03
64.4	2.38E-02	2.00E-02	1.50E-02	9.98E-03	5.00E-03	2.50E-03
80.5	5.61E-03	4.49E-03	3.37E-03	2.24E-03	1.12E-03	5.61E-04

**Tabla 43 Dosis máxima Individual TIROIDES (% de Inventario Liberado)**

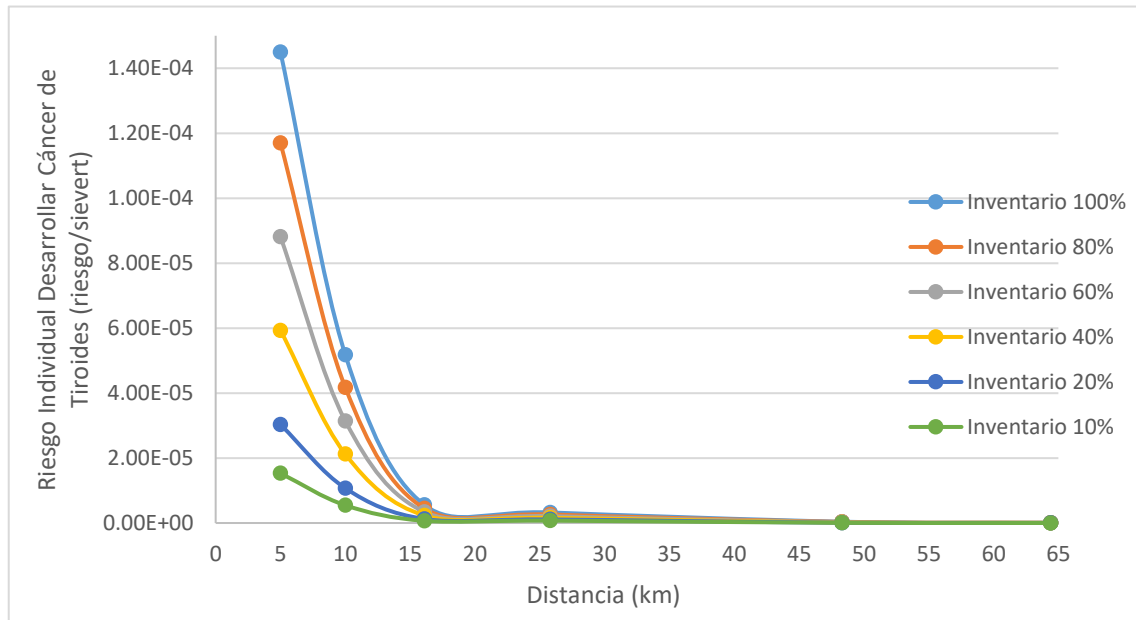




**Gráfico 13 Dosis Máxima Individual TIROIDES vs Distancia**

Distancia (km)	Riesgo Individual de Desarrollar Cáncer de Tiroides (riesgo/sievert)					
	100%	80%	60%	40%	20%	10%
5	1.45E-04	1.17E-04	8.81E-05	5.93E-05	3.03E-05	1.53E-05
10	5.18E-05	4.17E-05	3.14E-05	2.12E-05	1.07E-05	5.46E-06
16.1	5.57E-06	4.48E-06	3.42E-06	2.32E-06	1.24E-06	6.80E-07
25.8	3.25E-06	2.62E-06	2.11E-06	1.60E-06	1.10E-06	7.35E-07
48.3	4.01E-07	3.35E-07	2.51E-07	1.68E-07	8.39E-08	4.19E-08
64.4	8.00E-08	6.40E-08	4.80E-08	3.20E-08	1.60E-08	8.00E-09

**Tabla 44 Riesgo Individual de Desarrollar Cáncer de Tiroides (% inventario liberado)**



**Gráfico 14 Riesgo Individual de Desarrollar Cáncer de Tiroides vs Distancia**

#### 4.21. COMBINACIONES DE FRACCIONES DE PONDERACIÓN PARA DOS RESPUESTAS A ESCENARIOS DE EMERGENCIA Y SU INFLUENCIA EN LOS EFECTOS A LA SALUD

La combinación se desarrolla de acuerdo con la suposición dónde un porcentaje de la población evacuaría al recibir la notificación para hacerlo y otro porcentaje de la población se quedaría atrás.

El módulo EARLY de MACCS acumula las dosis de radiación para las personas evacuadas agregando la dosis que recibieron antes de que comenzaran a moverse y la dosis recibida durante la evacuación. Se manejó una liberación del mayor accidente creíble (pero con una probabilidad extremadamente baja de ocurrencia) para que se pudiese observar mejor la variación en la dosis y riesgo individual.

¿Cómo afecta el movimiento de la población después de la emergencia en el cálculo de muertes tempranas y dosis recibida?

Distancia (km)	Dosis Máxima Total Individual Cuerpo Completo (Sv)					
	Reubicación	60-40	70-30	80-20	90-10	Evacuación Completa
5	2.31E+00	1.52E+00	1.39E+00	1.26E+00	1.13E+00	9.97E-01
8.1	5.06E-01	3.21E-01	2.90E-01	2.59E-01	2.28E-01	1.97E-01
16.1	2.24E-01	1.25E-01	1.09E-01	9.20E-02	7.55E-02	5.90E-02
25.8	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02	5.48E-02
48.3	1.41E-02	1.41E-02	1.41E-02	1.41E-02	1.41E-02	1.41E-02
64.4	8.80E-03	8.80E-03	8.80E-03	8.80E-03	8.80E-03	8.80E-03
80.5	2.64E-03	2.64E-03	2.64E-03	2.64E-03	2.64E-03	2.64E-03

Tabla 45 Dosis Máxima Total Individual Cuerpo Completo (escenarios de respuesta)

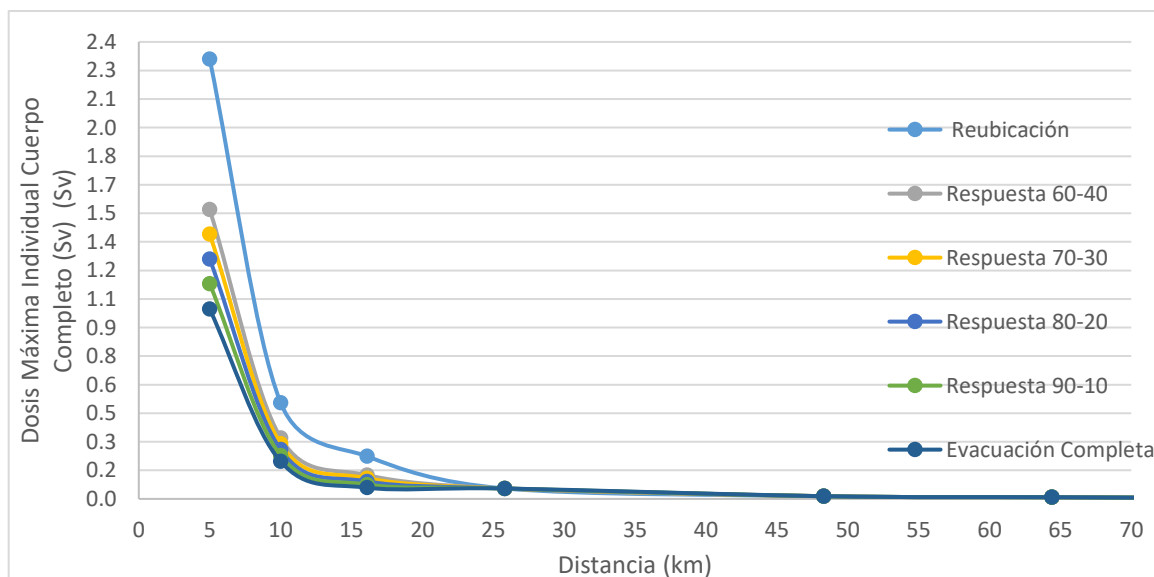


Gráfico 15 Dosis Máxima Total Individual vs Distancia (escenarios respuesta a emergencia)

Distancia (km)	Riesgo Individual Desarrollar Cáncer de Tiroides (riesgo/sievert)					
	Reubicación	60-40	70-30	80-20	90-10	Evacuación Completa
5	1.90E-04	1.61E-04	1.56E-04	1.52E-04	1.47E-04	1.42E-04
10	8.02E-05	6.22E-05	5.92E-05	5.63E-05	5.33E-05	5.03E-05
16.1	1.89E-05	1.05E-05	9.07E-06	7.67E-06	6.27E-06	4.87E-06
25.8	3.25E-06	3.25E-06	3.25E-06	3.25E-06	3.25E-06	3.25E-06
48.3	4.01E-07	4.01E-07	4.01E-07	4.01E-07	4.01E-07	4.01E-07
64.4	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08	8.00E-08

Tabla 46 Riesgo Individual de Desarrollar Cáncer de Tiroides (escenarios de respuesta a emergencia)

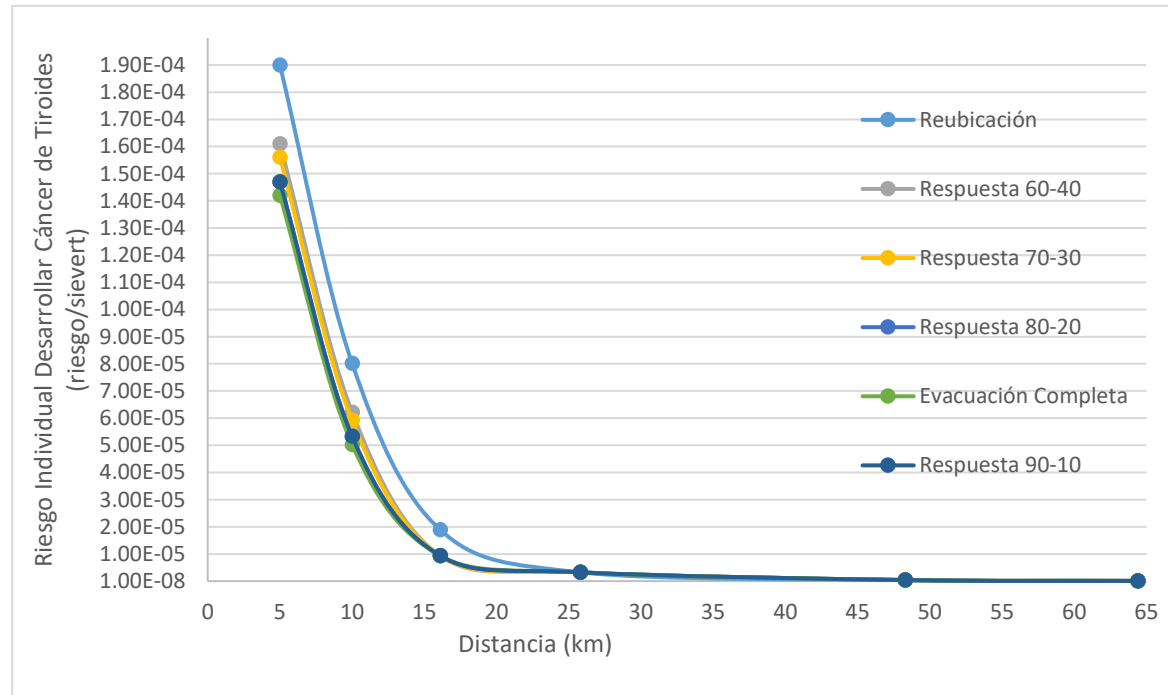


Gráfico 16 Riesgo Individual Desarrollar Cáncer de Tiroides vs Distancia (escenarios respuesta a emergencia)

Distancia (km)	Muertes Latentes por cáncer					
	Reubicación	60-40	70-30	80-20	90-10	Evacuación 100%
5	37.5	28.5	27.0	25.5	24.1	22.6
10	82.9	58.7	54.7	50.6	46.6	4.26E+01
16.1	133	86.2	78.5	70.8	63.0	5.53E+01
25.8	148	102	93.8	86.1	78.4	7.06E+01
48.3	170	123	116.2	108	100	9.25E+01
64.4	185	139	131	123	115	1.08E+02
80.5	187	140	133	125	117	1.09E+02

Tabla 47 Muertes Latentes por cáncer (escenarios respuesta a emergencia)

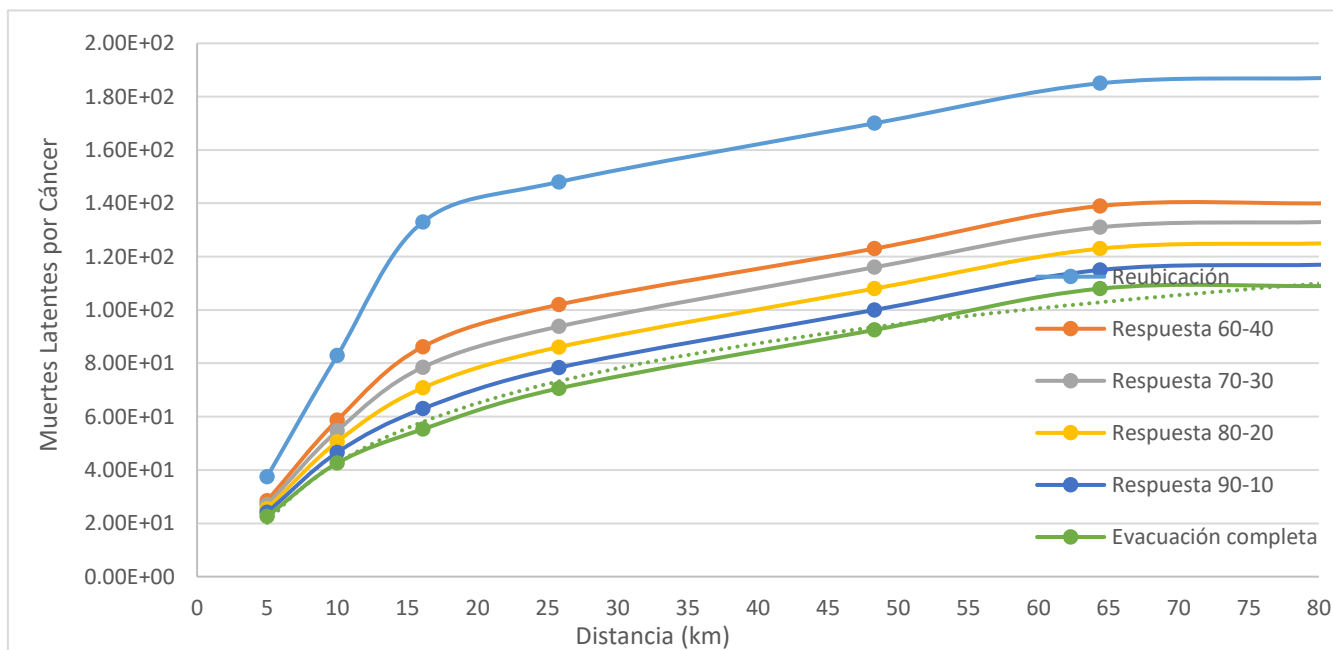


Gráfico 17 Muertes Latentes por cáncer vs Distancia (escenarios respuesta a emergencia)

Distancia (km)	Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer (casos/persona-sievert)					
	Reubicación	60-40	70-30	80-20	90-10	Evacuación 1
5	2.71E-03	1.85E-03	1.71E-03	1.57E-03	1.42E-03	1.28E-03
10	1.61E-03	1.05E-03	9.52E-04	8.58E-04	7.64E-04	6.71E-04
25.8	1.06E-03	7.27E-04	6.71E-04	6.16E-04	5.61E-04	5.05E-04
48.3	5.12E-04	3.72E-04	3.49E-04	3.26E-04	3.02E-04	2.79E-04
64.4	1.39E-04	1.04E-04	9.87E-05	9.28E-05	8.70E-05	8.12E-05
80.5	9.00E-05	6.76E-05	6.39E-05	6.02E-05	5.64E-05	5.27E-05

Tabla 48 Riesgo Poblacional de Desarrollar Cáncer (escenarios respuesta a emergencia)

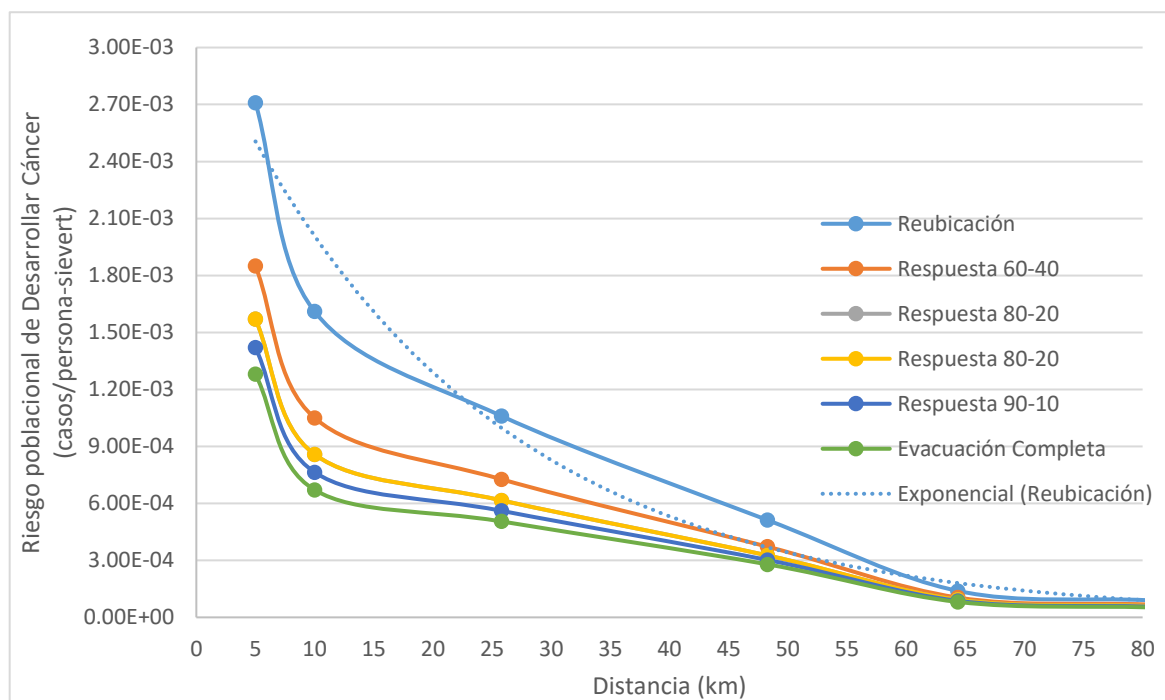


Gráfico 18 Riesgo poblacional de Desarrollar Cáncer vs Distancia (escenarios respuesta a emergencia)

Distancia (km)	Dosis Máxima Individual TIROIDES (Sv)					
	Reubicación	60-40	70-30	80-20	90-10	Evacuación Completa
5	7.24E+00	5.15E+00	4.80E+00	4.45E+00	4.11E+00	3.76E+00
10	1.58E+00	1.07E+00	9.88E-01	9.03E-01	8.19E-01	7.35E-01
16.1	6.87E-01	3.73E-01	3.20E-01	2.68E-01	2.16E-01	1.63E-01
25.8	3.68E-01	3.68E-01	3.68E-01	3.68E-01	3.68E-01	3.68E-01
48.3	1.45E-01	1.45E-01	1.45E-01	1.45E-01	1.45E-01	1.45E-01
64.4	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02	2.38E-02
80.5	5.61E-03	5.61E-03	5.61E-03	5.61E-03	5.61E-03	5.61E-03

Tabla 49 Dosis Máxima Individual TIROIDES (escenarios respuesta a emergencia)

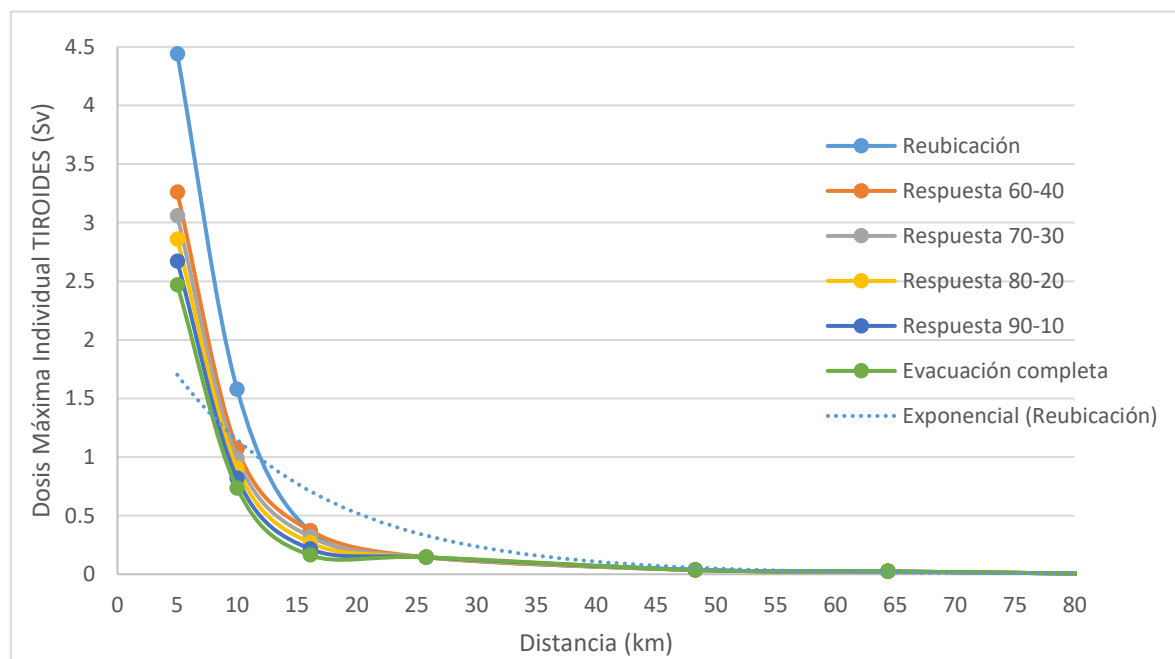


Gráfico 19 Dosis Máxima Individual TIROIDES vs Distancia (escenarios de respuesta a emergencia)

Los análisis de sensibilidad muestran que el efecto de aumentar el tamaño del área de evacuación disminuye el riesgo individual de muertes latentes por cáncer (LCF) más allá de 16 km de radio pero incrementa el riesgo individual dentro de los 16 km. El incremento en el riesgo a la población residente dentro de 16 km ocurre por la congestión del tráfico debido a una gran evacuación. Para áreas con un radio mayor a 32 km, la reducción del riesgo es asociada con el incremento en el tamaño del área de evacuación.

Los diferentes escenarios de liberación coinciden en que a una mayor altura de liberación en estelas flotantes los valores de TEDE son menores. La dosis, la concentración al nivel del suelo y por lo tanto los resultados de efectos tempranos a la salud, se reducen exponencialmente a lo largo de la distancia más allá de la fuente.

En los casos anteriores en los que se combinó el % de evacuación y no evacuación, debido a que la distancia máxima de evacuación se definió como 16 km, la dosis para cuerpo completo y tiroides después de esta distancia, se mantiene constante para todos los casos, mientras que entre los 5 km y los 16 km donde se contemplan acciones de protección la dosis individual y el riesgo de cáncer se reducen exponencialmente al aumentar el porcentaje de evacuación inmediata.

Es importante mencionar que a pesar de que se logre una evacuación del 100% de la población, la dosis recibida previamente y durante la evacuación contribuye al riesgo de cáncer y muertes latentes por lo cual este valor no es de cero.

Más adelante en el módulo CHRONC se obtiene la distancia a la cual las acciones de protección son necesarias, ya que ésta depende de las condiciones del accidente, meteorológicas y de sitio. Diferentes combinaciones de parámetros de liberación y datos meteorológicos, con la misma cantidad de material liberado, puede dar lugar a una gran diferencia en los efectos tempranos a la salud, por ello, las acciones de protección se requieren a diferentes distancias en diferentes situaciones de accidente.



## 4.22. MÓDULO CHRONC

El módulo CHRONC simula los eventos que ocurren después de la fase de emergencia, período de tiempo modelado por EARLY. Se pueden tomar varias medidas de protección a largo plazo durante este período para limitar las dosis de radiación a niveles aceptables. CHRONC calcula los efectos de salud individuales que resultan de la exposición directa a suelo contaminado y por la inhalación de materiales resuspendidos, así los efectos indirectos a la salud causados por el consumo de alimentos y agua contaminados. Cuatro vías de exposición a largo plazo se modelan para predecir la dosis de radiación a largo plazo: *groundshine*, resuspensión, inhalación e ingestión de agua y alimentos contaminados. La dosis de cada una de las vías a largo plazo se evalúa para cada elemento espacial que rodea el sitio del accidente. Para la fase intermedia solo se consideran *groundshine* e inhalación por resuspensión.

La dosis de radiación para las vías de exposición de las fases intermedia y a largo plazo es calculado para cada uno de los elementos espaciales utilizando la concentración inicial en el suelo bajo la línea central de la pluma calculada por el módulo ATMOS.

### 4.23.1. FASE INTERMEDIA

Si se cumple el criterio de dosis de fase intermedia, se supone que la población residente está sujeta a la exposición a la radiación por *groundshine* y resuspensión en la totalidad de la fase intermedia. Si la exposición en fase intermedia conduce a dosis superiores a la establecida para reubicación, se supone que la población será reubicada en áreas no contaminadas hasta el final de la fase intermedia, pueden configurarse los cálculos con una fase intermedia de duración tan corta como cero (sin fase intermedia, y una fase a largo plazo que comienza inmediatamente después de la fase de emergencia).

### 4.23.2. FASE A LARGO PLAZO

Las decisiones sobre medidas de mitigación en la fase a largo plazo se basan en dos conjuntos de acciones independientes:

Decisiones relacionadas a si la tierra en un lugar y tiempo específicos es adecuada para la habitación por humanos, "habitabilidad".

Decisiones relativas a si la tierra en un lugar y tiempo específicos es adecuada para la producción agrícola, "farmabiología".

La fase a largo plazo incorpora una distinción fundamental entre las consecuencias asociadas con el uso agrícola de la tierra y la que es habitada por humanos.

#### **4.23. DECISIONES DE HABITABILIDAD (ACCIONES DE DESCONTAMINACIÓN)**

La toma de decisiones sobre la habitabilidad puede generar tres posibles resultados: la tierra es inmediatamente habitable, la tierra es habitable después de la descontaminación y la tierra es habitable después de una combinación de descontaminación e interdicción. El primer paso es una determinación de si, en la ausencia de accidentes mitigantes, la tierra es apta para ser habitada durante el período de exposición a largo plazo. Esto se hace, comparando la dosis individual proyectada calculada por el código para el período de proyección de dosis a largo plazo contra el criterio especificado por el usuario para dosis de exposición a largo plazo. Si la dosis no excede el criterio, entonces la tierra se considera inmediatamente habitable, si no lo es, entonces se evalúan una serie progresiva de acciones comenzando con descontaminación. Si el esfuerzo de descontaminación de nivel máximo es insuficiente para permitir la habitabilidad al final del período de descontaminación, entonces se evalúan los impactos de reducción de dosis por descontaminación en combinación con interdicción temporal para determinar si el criterio de habitabilidad es cumplido al finalizar los períodos de descontaminación e interdicción, el período máximo considerado es de 30 años.

El efecto de la intemperie y el decaimiento durante el período de interdicción se calcula con una técnica de interpolación que utiliza dosis pre calculadas para períodos de interdicción predefinidos de 1, 5 y 30 años. Para los usos del suelo, agricultura y población, se eligen acciones de mitigación de menor costo para satisfacer los criterios aplicables. Para terreno agrícola, los criterios definen niveles aceptables de contaminación de los alimentos, mientras que para terreno no agrícola y de residencia, los criterios definen niveles aceptables de exposición a radiación de los individuos residentes. La duración máxima del período de interdicción de las tierras de cultivo es de 8 años, mientras que la prohibición correspondiente para la interdicción para la población es de 30 años. Si es insuficiente para satisfacer los criterios de uso respectivos, entonces se supone que el uso de la tierra está permanentemente prohibido o condenado. El uso de la tierra para agricultura o población también puede ser condenado si el costo total involucrado en restaurarlo excedería el valor especificado por el usuario de la propiedad. Cuando el suelo es condenado por cualquiera de las dos razones, el código calcula las exposiciones correspondientes a alimentos y población a largo plazo como cero y evalúa un costo económico por la condena de la propiedad.

## 4.24. INFORMACIÓN SOBRE COSTOS DE ACCIONES PROTECTIVAS Y REPARADORAS

Se usa para definir los costos de compensación para las personas que están sujetas a las acciones de emergencia de evacuación, refugio o reubicación. La evacuación es únicamente bajo el control de los modelos definidos en EARLY. La reubicación de personas puede ocurrir durante la fase de emergencia EARLY o durante la fase intermedia de la fase CHRONC. En la presentación de los resultados del costo económico, los costos asociados con la fase de emergencia (es decir, evacuación y reubicación a corto plazo) se informa por separado de los costos asociados con la fase intermedia (es decir, los costos por día de reubicación durante el tiempo de fase intermedia).

Las dosis máximas permisibles definidas en CHRONC se usan para determinar la necesidad de reubicación, descontaminación, interdicción o condena.

## 4.25. RESULTADOS MÓDULO CHRONC

El módulo calcula la dosis poblacional a largo plazo, desglosada por vía para una lista de órganos definidos por el usuario. Todos los resultados de dosis son reportados en sieverts por persona, aunque las unidades se enumeran simplemente como sieverts (Sv). El módulo EARLY produce solo una medida de consecuencia relacionada con la dosis total de la población.

### 4.25.1. DOSIS TOTALES A LARGO PLAZO DE TODAS LAS VÍAS.

Dosis poblacionales totales a largo plazo (*groundshine* y resuspensión), a partir del consumo de alimentos contaminados, de la ingestión de agua superficial contaminada y del trabajo de descontaminación.

- Dosis poblacional total a largo plazo (*groundshine* y resuspensión).
- Dosis poblacional total a largo plazo por ingestión.
- Dosis Poblacional Total a largo plazo recibida por la población residente (*groundshine*).
- Dosis Poblacional Total a largo plazo recibida por la población residente por resuspensión.
- Dosis Poblacional Total a largo plazo recibida vía *groundshine* por trabajadores que realizan labores de descontaminación de terreno no agrícola.

- Dosis Poblacional Total a largo plazo recibida vía *groundshine* por trabajadores que realizan labores de descontaminación de terreno agrícola.
- Dosis total de la población a largo plazo por ingestión de agua superficial contaminada.

#### **4.25.2. CONTAMINACIÓN POR CONSUMO DE CULTIVOS, LECHE Y CARNE.**

Dosis poblacionales totales a largo plazo como resultado del consumo de algunos alimentos por humanos.

- Del consumo de granos.
- Del consumo de vegetales de hoja.
- Del consumo de cultivos de raíz.
- Del consumo de frutos.
- Del consumo de legumbres.
- Del consumo de leche.
- Del consumo de carne de aves de corral.
- Del consumo de carne de otros animales

La región de interés se especifica para determinar el tamaño del área contaminada a ser evaluada, la dosis poblacional resulta del material depositado dentro de la región. Para las vías de exposición directa (*groundshine* y resuspensión), la dosis es recibida por la población residente, pero para las vías de exposición indirectas de ingestión y descontaminación, la dosis podría ser recibida por individuos que residen en otro lugar.

#### **4.25.3. DISTANCIA CUBIERTA POR ACCIONES DE PROTECCIÓN.**

Distancias máximas a las cuales las acciones a largo plazo son requeridas.

- Descontaminación de tierras de cultivo.
- Descontaminación de terreno no-agrícola.
- Descontaminación o interdicción de tierras de cultivo.
- Descontaminación o interdicción de terreno no-agrícola.
- Desecho de 3 meses de leche y productos lácteos.
- Desecho de 1 año de cultivos.

#### 4.25.4. ÁREA/POBLACIÓN AFECTADAS POR ACCIONES DE DESCONTAMINACIÓN A LARGO PLAZO.

Áreas (has) dentro de las cuales las labores de descontaminación a largo plazo son requeridas. Cantidad de población afectada por labores de descontaminación.

- Población afectada por labores de descontaminación de terreno agrícola.
- Área dentro de la cual la descontaminación de terreno no-agrícola es requerida.
- Población afectada por labores de descontaminación de terreno no agrícola.
- Área dentro de la cual la descontaminación o interdicción de las tierras de cultivo es requerida.
- Área dentro de la cual la descontaminación o interdicción de las tierras de cultivo es requerida.
- Área dentro de la cual la descontaminación o interdicción de terreno no-agrícola es requerida.
- Área máxima dentro de la cual es requerido desechar 3 meses de leche y productos lácteos.
- Área máxima dentro de la cual es requerido desechar 1 año de cultivos.

Se presentan los resultados de las listas anteriores del módulo CHRONC para:

- Liberación superior al 10% del inventario inicial de Cs-I (15%)

Correspondiente a la categoría de Liberación Alta.

CHRONC calcula los efectos de salud individuales que resultan de la exposición directa a suelo contaminado y por inhalación de materiales resuspendidos. En la tabla siguiente se muestran el número de personas afectadas por diferentes tipos de cáncer latentes dentro de los primeros 80 km de radio. La media de las consecuencias, el percentil 95 y el 99.5. Resultados dependientes de la variabilidad de condiciones meteorológicas, se presentan a continuación para cada una de las variables tratadas en CHRONC.

**MEDIA DE LAS CONSECUENCIAS:** Es el promedio de consecuencias sobre todas las pruebas climáticas. Es calculado tomando la suma de todos los resultados para cada prueba climática.

**PERCENTIL 95:** Este nivel de consecuencia es independiente de la dirección, es decir, el promedio de todos los sectores a la distancia de interés.

**PERCENTIL 99.5:** El más alto de los 16 sectores. Se define como el percentil 99.5, peor sector meteorológico/condición de consecuencia. Este nivel de consecuencia es entonces basado en la dirección y tiende a exceder el percentil de consecuencia 95 más allá de una milla para la mayoría de los sitios.

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de arribo de la pluma a diferentes distancias a partir de la fuente, dirección de viento reinante (NE) y velocidad promedio de viento de 5 m/s.

<b>Tiempo promedio de arribo de la pluma</b>	
4 km	3.38 hrs
8 km	3.91 hrs
16 km	4.8 hrs
21 km	5.08 hrs
32 km	5.66 hrs
64 km	7.19 hrs
80 km	8.08 hrs

**Tabla 50 Tiempo de arribo de la pluma**

**En la Tabla 51**

Tabla 51 se muestran los resultados generados por MACCS para los efectos a la salud (cáncer fatal pulmón, tiroides, seno, aparato de Gi, leucemia, huesos) dentro de un radio de 80.5 km, además de la cantidad de posibles apariciones de cáncer (totales) dentro de los primeros 4.8 km, 16.1 km, 32.2 km y 80.5 km.

<b>EFFECTOS A LA SALUD</b>	<b>DISTANCIA (KM)</b>	<b>MEDIA</b>	<b>PERCENTIL 95</b>	<b>PERCENTIL 99.5</b>
<b>CANCER FATAL/PULMÓN</b>	0-80.5 km	14.2	35.7	342
<b>CANCER FATAL/TIROIDES</b>	0-80.5 km	0.697	1.49	7.76
<b>CANCER FATAL/SENO</b>	0-80.5 km	4.77	11.3	55.1
<b>CANCER FATAL/APARATO DE GI</b>	0-80.5 km	12.3	25.2	118
<b>CANCER FATAL/LEUCEMIA</b>	0-80.5 km	6.22	13.5	67
<b>CANCER FATAL/HUESOS</b>	0-80.5 km	2.07	5.54	52
<b>CANCER FATAL/TOTAL</b>	1.2-4.8 km	9.34	32.6	70.7
<b>CANCER FATAL/TOTAL</b>	1.2-16.1 km	27.8	80.1	109
<b>CANCER FATAL/TOTAL</b>	1.2-32.2 km	28.1	80.2	109
<b>CANCER FATAL/TOTAL</b>	1.2-80.5 km	53.4	12.9	821

**Tabla 51 Resultados Efectos Tempranos, módulo CHRONC (0-80.5 km)**

También calcula los efectos indirectos a la salud causados por el consumo de alimentos y agua contaminados. Se calculan las dosis para cuatro vías de exposición a largo plazo: *groundshine*, resuspensión, inhalación e ingestión de agua y alimentos contaminados, así como la dosis recibida debido a las labores de descontaminación de terreno agrícola y no agrícola.

DOSIS POBLACIONAL COMPROMETIDA CUERPO COMPLETO (Sv)	0.5-16.1 km			16.1-80.5 km		
	MEDIA	PERCENTIL 99.5	CONSECUENCIA MÁXIMA	MEDIA	PERCENTIL 99.5	CONSECUENCIA MÁXIMA
DOSIS TOTAL A LARGO PLAZO DE TODAS LAS VÍAS	9.41E+03	1.19E+04	1.43E+04	5.69E+02	1.72E+04	9.47E+04
DOSIS VÍAS DE EXPOSICIÓN DIRECTAS A LARGO PLAZO	9.99E+01	4.52E+02	5.88E+02	4.91E+02	1.52E+04	8.67E+04
DOSIS TOTAL VÍAS DE INGESTIÓN	8.84E+03	1.14E+04	1.17E+04	4.47E+01	1.33E+03	2.26E+03
DOSIS GROUNDSHINE A LARGO PLAZO	2.34E+01	2.51E+02	5.83E+02	2.59E+02	8.06E+03	8.47E+04
DOSIS RESUSPENSIÓN A LARGO PLAZO	7.65E+01	4.22E+02	5.12E+02	2.31E+02	1.29E+02	
DOSIS POR INGESTIÓN DE AGUA	8.84E+03	1.04E+04		4.08E+01	1.33E+03	2.23E+03
POB- DOSIS POBLACIONAL POR DESCONTAMINACIÓN	4.64E+02	2.16E+03	3.03E+03	3.00E+01	5.53E+02	1.98E+04
FARM- DOSIS POBLACIONAL POR DESCONTAMINACIÓN	4.01E+00	2.31E+01	2.90E+01	3.62E+00	5.18E+01	7.60E+01
INGESTIÓN DE GRANOS	2.18E-02	2.08E-01	2.51E-01	8.16E-02	5.71E-01	8.21E-01
INGESTIÓN DE VEGETALES DE HOJA	1.93E-01	2.03E+00	2.31E+00	4.03E-01	5.01E+00	5.55E+00
INGESTIÓN DE CULTIVOS DE RAÍZ	1.14E-01	1.20E+00	1.51E+00	1.77E-01	1.27E+00	3.31E+00
INGESTIÓN DE FRUTAS	5.74E-02	4.43E-01	5.50E-01	2.03E-01	1.93E+00	2.79E+00
INGESTIÓN DE LEGUMBRES	2.13E-01	2.29E+00	2.80E+00	2.72E-01	2.95E+00	5.79E+00
INGESTION OF CARNE DE RES	4.20E-02	4.47E-01	7.07E-01	1.24E+00	7.69E+00	1.20E+01
INGESTIÓN DE LECHE	8.47E-02	8.77E-01	1.20E+00	1.09E+00	7.17E+00	1.00E+01
INGESTIÓN DE AVES DE CORRAL	4.26E-03	3.46E-02	8.13E-02	8.32E-02	1.41E+00	2.88E+00

INGESTIÓN DE CARNE (OTROS ANIMALES)	2.27E-02	3.07E-01	4.90E-01	3.97E-01	2.78E+00	3.14E+00
-------------------------------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Tabla 52 Dosis Poblacional Comprometida Cuerpo Completo (todas las vías), Módulo CHRONC (0-80.5 km)

En la Tabla 53; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las dosis anuales máximas en alimentos, proyectadas para un individuo que se encuentra entre 0.5 y 80.5 km de la fuente.

DOSIS ANUAL MÁXIMA EN ALIMENTOS (EFECTIVA)	DISTANCIA	PROMEDIO	PERCENTIL 95TH	PERCENTIL 99.5TH	CONSEC. MÁXIMA
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	0.5-1.2 km	1.34E-04	5.26E-04	3.69E-03	3.96E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	1.2-1.6 km	6.95E-04	3.14E-03	3.95E-03	4.94E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	4.8-5.6 km	1.68E-03	4.32E-03	5.57E-03	5.85E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	5.6-8.1 km	2.04E-03	4.44E-03	1.22E-02	3.33E-02
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	8.1-11.3 km	1.62E-03	4.17E-03	9.59E-03	1.08E-02
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	11.3-16.1 km	1.53E-03	4.00E-03	****	6.19E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	16.1-20.9 km	1.13E-03	3.16E-03	3.96E-03	5.58E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	32.2-40.2 km	8.01E-04	3.05E-03	3.98E-03	5.42E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	40.2-48.3 km	1.11E-03	4.72E-03	****	7.97E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	48.3-64.4 km	7.76E-04	2.67E-03	3.63E-03	4.99E-03
PROYECTADA PARA UN INDIVIDUO	64.4-80.5 km	3.81E-04	2.34E-03	4.97E-03	1.04E-02

Tabla 53 Dosis Anual Máxima en alimentos, Módulo CHRONC (0-80.5 km)

En la siguiente tabla se muestran las distancias máximas cubiertas por acciones de protección y descontaminación (en km) tanto para terreno agrícola como para no agrícola, así como el radio en el que será necesario deshacerse de leche y cultivos durante aproximadamente un año.

DISTANCIA MÁXIMA PARA ACCIONES DE DESCONTAMINACIÓN (km)	MEDIA	PERCENTILES		CONSECUENCIA MÁXIMA
		95	99.5	
FARM-DISTANCIA DE DESCONTAMINACIÓN	29.5	47.1	****	80.5
POB- DISTANCIA DE DESCONTAMINACIÓN	24.9	42.3	65.3	80.5
FARM-DISTANCIA INTERDICCIÓN	39.6	****	****	80.5
POB- DISTANCIA INTERDICCIÓN	24.9	42.3	65.3	80.5



<b>FARM-DISTANCIA TERRENO CONDENADO</b>	6.4	17.4	****	25.8
<b>POB-DISTANCIA TERRENO CONDENADO</b>	8.47	19.7	****	40.2
<b>DISTANCIA ELIMINACIÓN DE LECHE</b>	40.1	78.3	94.4	113
<b>DISTANCIA ELIMINACIÓN DE CULTIVOS</b>	39.1	****	****	80.5

**Tabla 54 Distancia Máxima de Acciones a Largo Plazo, MÓDULO CHRONC**

Tabla 55 corresponde al área (ha) y población (individuos) que se verán afectados por acciones de protección o descontaminación a largo plazo después de la etapa de emergencia.

ÁREA AFECTADA/POBLACIÓN	0-16.1 km				16.1-80.5 km			
	MEDIA	PERCENTIL 95	PERCENTIL 99.5	CONSEC. MÁXIMA	MEDIA	PERCENTIL 95	PERCENTIL 99.5	CONSEC. MÁXIMA
DESCONTAMINACIÓN DE TERRENO AGRÍCOLA (ha)	140	436	586	659	736	3090	3990	5330
DESCONTAMINACIÓN DE TERRENO NO AGRÍCOLA (INDIVIDUOS)	2810	7800	12800	16400	1520	588	17500	1.10E+06
ÁREA DESCONTAMINACIÓN DE TERRENO NO AGRÍCOLA (ha)	6660	14000	21200	23900	26800	75600	86900	1.25E+05
ÁREA DE INTERDICCIÓN DE TERRENO AGRÍCOLA (ha)	150	438	586	659	1490	6130	8150	8340
INTERDICCIÓN DE TERRENO NO AGRÍCOLA (INDIVIDUOS)	2810	7800	12800	16400	1520	588	17500	1.10E+06
ÁREA INTERDICCIÓN DE TERRENO NO AGRÍCOLA (ha)	6660	14400	21200	23900	26800	75600	86900	1.25E+05
ÁREA CONDENADA DE TERRENO AGRÍCOLA (ha)	27.3	117	322	432	3.61	0	170	333
TERRENO NO AGRÍCOLA CONDENADO (INDIVIDUOS)	3150	10300	12000	16600	2.24	0	125	432
ÁREA DE TERRENO NO AGRÍCOLA CONDENADO (ha)	3320	10400	12400	16400	991	7230	25300	2.65E+04
ÁREA ELIMINACIÓN DE LECHE (ha)	162		****	667	1430		7790	8340
ÁREA ELIMINACIÓN DE CULTIVOS (ha)	167		****	667	1420		8150	8340

**Tabla 55 Población/Área afectada por las Acciones de Descontaminación (0-80.5 km)**

Con base en una densidad de población de 105 personas/km<sup>2</sup>. CHRONC calcula el número de personas que deben ser evacuadas y reubicadas (en fase temprana o a largo plazo).

POBLACIÓN EVACUADA Y REUBICADA	0-16.1 km				16.1-80.5 km			
	MEDIA	PERCENTIL 95	PERCENTIL 99.5	CONSEC. MÁXIMA	MEDIA	PERCENTIL 95	PERCENTIL 99.5	CONSEC. MÁXIMA
EVACUADOS NO AFECTADOS POR LA PLUMA	3.71E+03	1.05E+04	1.33E+04	1.95E+04	3.71E+03	1.05E+04	1.33E+04	1.95E+04
EVACUADOS AFECTADOS POR LA PLUMA	6.83E+03	1.45E+04	****	1.94E+04	6.83E+03	1.45E+04	****	1.94E+04
REUBICACIÓN NORMAL FASE DE EMERGENCIA	3.05E+01	1.10E+02	2.11E+02	3.89E+02	3.61E+01	1.32E+02	2.65E+02	4.03E+02
REUBICACIÓN TEMPRANA FASE DE EMERGENCIA	2.19E+02	5.97E+02	7.81E+02	8.28E+02	2.22E+02	5.99E+02	7.48E+02	9.63E+02
FASE INTERMEDIA DE REUBICACIÓN	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
REUBICACIÓN NIVEL 1 DE DESCONTAMINACIÓN	5.48E+02	2.51E+03	3.75E+03	6.38E+03	1.48E+03	2.61E+03	4.54E+03	8.49E+05
REUBICACIÓN NIVEL 2 DE DESCONTAMINACIÓN	1.18E+03	3.53E+03	6.49E+03	9.57E+03	1.76E+03	3.85E+03	1.34E+04	2.55E+05
REUBICACIÓN NIVEL 3 DE DESCONTAMINACIÓN	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
DESCONTAMINACIÓN+INTERDICCIÓN REUBICACIÓN	1.08E+03	3.53E+03	7.07E+03	1.02E+04	1.09E+03	3.55E+03	7.07E+03	1.03E+04
REUBICACIÓN/CONDENA	3.15E+03	1.03E+04	1.20E+04	1.66E+04	3.15E+03	1.03E+04	1.20E+04	1.66E+04

**Tabla 56 Población Evacuada y Reubicada (0-80.5 km)**

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El APS de Nivel 3 incorpora la transición de los resultados de la definición de Estados de Daño de la Planta, la categorización de liberaciones y la determinación del término fuente del Nivel 2.

Un análisis de Nivel 3 incorpora información incluyendo demografía, planes de emergencia, propiedades físicas de radioisótopos, meteorología, dispersión atmosférica y transporte, tamaño de estructuras cercanas, protección radiológica y otras disciplinas.

La evaluación integrada de riesgos en este nivel, consiste en la combinación de varios análisis, por ejemplo, análisis de frecuencia de accidentes, análisis de progresión de accidentes, análisis del término fuente y el análisis de consecuencias para formar una expresión del riesgo que incluye contribuciones de todos los iniciadores (Probabilidad x consecuencias) en este trabajo de tesis se abordaron las consecuencias de liberaciones hipotéticas para familiarizarse con el uso y conceptos de los códigos para análisis de consecuencias como una introducción al Nivel 3 que en un futuro deberá ser desarrollado en la Central Nuclear Laguna Verde.

Con el código HotSpot se simularon dos casos de altura efectiva (caso conservador a 0 m a la altura del suelo y otro caso de altura efectiva calculada para una pluma flotante) en las cuales se obtuvieron radios de dosis:

Caso conservador (Máxima Exposición 0 m):

**1.0 Sv (0.45 km<sup>2</sup>)      0.50 Sv (1.1 km<sup>2</sup>)      0.250 Sv (2.6 km<sup>2</sup>)**

En el caso de Máxima Exposición, la Dosis Efectiva Total a 5 km de la fuente es de aproximadamente 500 mSv, mientras que a 10 km es de 100 mSv, aún consideradas dosis media y baja respectivamente, la primera con efectos deterministas a la población por exposición directa.

Caso altura efectiva calculada (86 m Mínima Exposición):

Las Dosis correspondientes al perímetro Interno y medio de **1.0 Sv** y **0.5 Sv** no son alcanzados, mientras que los **0.25 Sv** que corresponden al perímetro externo abarca un área de **0.11 km<sup>2</sup>**

En el caso de Mínima Exposición la Dosis Efectiva Total a 5 km de la fuente es de aproximadamente 100 mSv, mientras que a 10 km es de 70 mSv, consideradas dosis bajas y sin efectos deterministas.

El alcance en Hotspot se limita a algunas pocas horas después de la liberación de productos de fisión al medio ambiente, pero proporciona una estimación rápida y conservadora de los valores de TEDE para la población circundante a una distancia menor a 200 km.

El gráfico de perímetros de dosis generado por el código permite conocer el área que recibe las dosis altas y muy altas y ayudar en los planes de evacuación inmediata de la población circundante.

La aproximación obtenida con Hotspot se realizó considerando una clase de estabilidad y una velocidad promedio de viento para la región modelada.

Por otra parte, MACCS se utiliza para estimar las dosis radiológicas, los efectos en la salud y las consecuencias económicas que podrían resultar de las liberaciones accidentales postuladas de materiales radiactivos a la atmósfera a corto, mediano y largo plazo.

Para aplicaciones regulatorias, el código es usado para calcular el TEDE a 50 años para especificar receptores estacionarios de una liberación de radiactividad a la atmósfera.

La variabilidad meteorológica puede ser tratada en MACCS con un algoritmo de muestreo aleatorio estratificado. En función de la distribución muestreada y la aplicación de los modelos de dosis y/o efectos de salud especificados por el usuario.

Los resultados son interpretados con respecto al riesgo individual de fatalidad y al riesgo individual de muerte latente por cáncer para cuantificar el riesgo

Primeramente, se incorporó un análisis de sensibilidad de la pluma para observar los efectos de flotabilidad, las dimensiones iniciales de la pluma y los efectos de estela en las liberaciones.

Se analizaron 4 casos a dos velocidades de viento:

Caso	Estabilidad de Clase D	
	Velocidad de Viento (4.5 m/s)	Velocidad de Viento (2.3 m/s)
Pluma Gaussiana Simple	•	•
Pluma flotante con efectos de estela	•	•
Pluma Flotante	•	•
Pluma no flotante con efectos de estela	•	•

Donde se encontró que:

Los valores de TED más altos son los obtenidos de los casos de plumas no flotantes a una velocidad de viento de 2.3 m/s, esto debido a que las concentraciones a 2.3 m/s son aproximadamente dos veces más grandes que las correspondientes a 4.5 m/s en plumas no flotantes, lo cual resulta en dosis efectivas totales mayores. En cambio, los valores más bajos de TED se muestran en el caso de plumas flotantes con efectos de estela debido a que agregar flotabilidad y efectos de estela combinados reduce aún más la concentración de material radiactivo a nivel del suelo.

Posteriormente se analizaron 4 casos de posibles inventarios liberados debido a un accidente:

- (1) Más de la mitad del inventario del núcleo de yodo, un tercio de Cesio y Telurio, el cual es propuesto como el accidente "Máximo Creíble
- (2) Liberación superior al 10% del inventario inicial de Cs-I (15%)
- (3) Liberación superior al 1% e inferior al 10% y (5%)
- (4) Liberación inferior al 1%

Donde;

Para el accidente máximo creíble la cantidad de muertes tempranas a una distancia de 16 km es 8, mientras que las posibles muertes por cáncer son de hasta 28 casos.

Para una liberación superior al 10% del inventario inicial, la cantidad de muertes tempranas a 16 km es de 1.5, mientras que las posibles muertes por cáncer es 9.43.

Número de casos con efectos deterministas entre 0.5 y 80 km [APÉNDICE]:  
Vómito prodrómico  $3.23E-01$ , tiroiditis  $2.41E-03$ , eritema 9.45 casos.

Número de casos aparición de Leucemia entre 0.5 y 80 km: 2.52

Mientras que, para una liberación del 5% la dosis comprometida máxima individual alcanzada para tiroides a 16 km es de  $7.29E-02$  Sv, la cantidad de posibles muertes tempranas es de  $3.41E-01$  y de posibles muertes por cáncer 4.53.

Para una liberación inferior al 1%, la dosis comprometida máxima individual a 16 km es de  $3.98E-02$  Sv, donde la cantidad de muertes tempranas es cero y las posibles muertes por cáncer 1.29.

Se analizaron los resultados para el 100, 80, 60, 40, 20 y 10% del inventario inicial del núcleo en una liberación hipotética hacia la atmósfera para encontrar una relación o comportamiento que permita predecir los resultados para estas variables sin necesidad de realizarse la simulación. En éste, se observa que las variables: concentración en el tiempo, dosis máxima individual, muertes latentes por cáncer, riesgo poblacional de cáncer, dosis máxima individual y riesgo individual de desarrollar cáncer disminuyen exponencialmente con la distancia, aumentan exponencialmente en el caso de muertes latentes.

En los casos en los que se combinó el porcentaje de evacuación y no evacuación, debido a que la distancia máxima de evacuación se definió como 16 km, la dosis para cuerpo completo y tiroides después de esta distancia, se mantiene constante para todos los casos, mientras que entre los 5 km y los 16 km donde se contemplan acciones de protección la dosis individual y el riesgo de cáncer se reducen exponencialmente al aumentar el porcentaje de evacuación inmediata.

El Módulo CHRONC en MACCS, calcula los efectos de salud individuales que resultan de la exposición directa a suelo contaminado y por la inhalación de materiales resuspendidos, así los efectos indirectos a la salud causados por el consumo de alimentos y agua contaminados.

Se analizó en este módulo una liberación superior al 10% del inventario inicial de Cs-I (15%) correspondiente a la categoría de liberación alta para la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

- Número de casos de aparición de cáncer fatal/ pulmón entre 0.5-80 km: **342**
- Número de casos aparición de leucemia entre 0.5-80 km: **67**
- Dosis individual por ingestión de agua entre 0.5-16 km: **1.04E+04 Sv**
- Dosis individual por ingestión de agua entre 16.1-80.5 km: **1.33E+03 Sv**
- Distancia media necesidad de descontaminación en terreno agrícola: **29.5 km**
- Distancia media necesidad de descontaminación en terreno no agrícola: **24.9 km**
- Distancia a la que es necesaria deshacerse durante un año de la producción total de leche: **40.1 km**
- Distancia a la que es necesario deshacerse durante un año de la producción total de cultivos: **39.1 km**
- Área de terreno agrícola con necesidad de labores de descontaminación durante los primeros 80.5 km: **876 ha**
- Área condenada de terreno agrícola tras labores de descontaminación dentro de un radio de 80 km: **27.3 ha**
- No. De individuos afectados debido a la condena de terreno no agrícola dentro de un radio de 80 km: **3150**
- Área condenada de terreno no agrícola tras labores de descontaminación dentro de un radio de 80 km: **3320 ha**

Con base en una densidad de población de 105 personas/km<sup>2</sup>. CHRONC calcula el número de personas que deben ser evacuadas y reubicadas (en fase temprana o a largo plazo).

- Individuos evacuados afectados por la pluma en los primeros 16 km\*: **6.83E+03**

\*Definida como la distancia máxima de evacuación (zona Vía Pluma en el PERE)



A continuación se muestran dos mapas dónde se trazaron los radios de las zonas definidas como: Zona Vía Pluma (5, 10, 16 km) y Vía ingestión (80 km) del PERE, además de radios adicionales de 40 y 60 km.

En las siguientes figuras pueden apreciarse las localidades más importantes (es decir aquellos con mayor densidad de población, que se encuentran dentro de estos radios).

La

Tabla 57 contiene la dosis máxima individual para cuerpo completo alcanzada como consecuencia de un Accidente Máximo Creíble.

Distancia	Dosis (Sv) Accidente Máximo Creíble
5 km	8.0
10 km	3.3
16 km	1.50
20 km	0.62
40 km	0.20
60 km	0.034
80 km	0.015

Tabla 57 Dosis Máxima individual, radios: zonas de protección

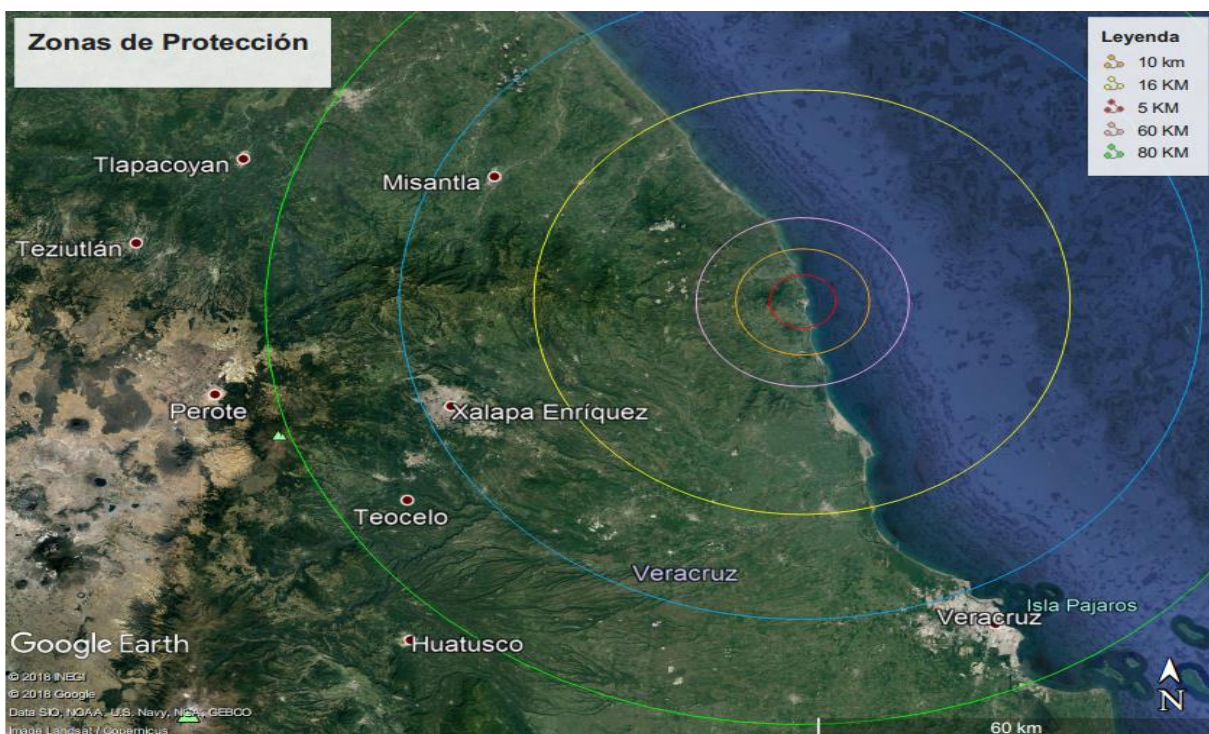


Figura 8 Radios: Zonas de protección



**Figura 9 Radios: Zonas de protección (zoom)**

Donde;

Según la clasificación de Dosis los efectos deterministas aparecen para las dosis efectivas agudas clasificadas como medianas, fuertes y muy fuertes por el UNSCEAR (Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de las radiaciones nucleares).

La absorción de una dosis entre 4 y 4.5 Sv se encuentra el llamado DL50, que es el punto en el que la exposición será fatal en el 50% de los casos, esta dosis se alcanza entre los 5 y 8 km de la fuente. La absorción de una dosis entre 0.5 y 2 Sv dará lugar a una reacción leve que implica náuseas, astenia y vómitos entre 3 y 6 horas después de la exposición, este nivel de dosis se tiene entre los 10 y 20 km.

En estos cálculos se utilizó una densidad de población base, más sin embargo debe considerarse en un estudio real que los primeros 5 km alrededor de la planta cuentan con una cantidad de población muy pequeña, lo cual representa otra capa de protección ante la ocurrencia de accidentes.

- HotSpot vs MACCS



HotSpot proporciona una aproximación de primer orden de los efectos de la radiación asociados con la liberación atmosférica de materiales radiactivos. Está diseñado para predicciones de dosis a órganos y TED a corta distancia y corto plazo.

Por su parte MACCS analiza la dispersión de la pluma a largo plazo incluyendo acciones de mitigación y costos de descontaminación.

El primero fue creado para equipar al personal de respuesta a emergencias con un software que permita estimar rápidamente la dosis a la que está expuesta la población en un evento que implique liberación de radiactividad al ambiente en cualquier instalación incluso como resultado de una bomba nuclear, presentando resultados de dosis más conservadores.

MACCS es único en su capacidad para modelar acciones de mitigación a corto y largo plazo, junto con el modelado de efectos a la salud determinísticos como estocásticos por lo cual es más recomendable su uso para un análisis de seguridad. Además, es posible utilizar un año de datos meteorológicos del sitio a analizar, por lo cual podemos obtener resultados de dosis para el peor día y la máxima consecuencia, mientras que en Hotspot se toma en cuenta solamente el valor promedio de la velocidad de viento y estabilidad.

Trabajo a futuro: La integración del riesgo que incorpora la transición de los resultados de la definición de Estados de Daño de Planta, la categorización de liberación y del término fuente obtenido en el Nivel 2 en un valor de riesgo [probabilidad de ocurrencia de las secuencias de liberación] [magnitud de las consecuencias] objetivo del APS Nivel 3.

Es necesario considerar los obstáculos para la dispersión de la nube que representa la orografía del sitio. Las elevaciones que ayudarían a aumentar la velocidad de deposición y por lo tanto la concentración a nivel del suelo en la región más cercana a la fuente significarían también una barrera en la dispersión de la nube a mayor distancia. En el cálculo de dosis y efectos de este trabajo no se considera este aspecto.

La obtención de datos meteorológicos y de sitio, así como de información acerca de las rutas de evacuación trazadas por el PERE y obtener valores de dosis más realistas para la población evacuada y reubicada.

## TÉRMINOS Y DEFINICIONES

**Accidente.** Todo suceso involuntario, incluidos los errores de operación, fallos de equipo u otros contratiempos, cuyas consecuencias reales o potenciales no sean despreciables desde el punto de vista de la protección o seguridad.

**Acción Protectora (Acción de protección).** Intervención con el fin de evitar o reducir las dosis a los miembros del público en situaciones de exposición crónica o de emergencia.

**Acción Reparadora (Acciones de descontaminación).** Acción que se realiza, cuando se rebasa un nivel de actuación determinado, para reducir las dosis de radiación que de lo contrario pudieran recibirse en una situación de intervención que implique exposición crónica.

**Actividad.** Magnitud correspondiente a una cantidad de radionúclido en un estado determinado de energía, en un tiempo dado, definida por la expresión:

$$A = dN/dt$$

siendo  $dN$  el valor esperado del número de transformaciones nucleares espontáneas a partir de ese estado determinado de energía, en el intervalo de tiempo  $dt$ . En el SI, la unidad de actividad es la inversa de segundo ( $s^{-1}$ ), que recibe el nombre de becquerel (Bq).

**Aumento de la flotabilidad de la pluma.** Los efectos de flotabilidad generalmente surgen si se contiene un calor sensible significativo en la nube liberada. Las principales fuentes de este tipo de nubes son eventos de explosión o incendios. La estimación del componente de flotabilidad requiere conocimiento del efluente y de la temperatura ambiente en el punto de liberación. Si la temperatura del efluente es más alta, se produce flotabilidad positiva, mientras que para una nube fría o densa se producirá flotabilidad negativa. La clase de estabilidad de la atmósfera es también un parámetro muy importante a tener en cuenta, ya que, afecta la magnitud de flotabilidad de la pluma. El aumento de la flotabilidad, generalmente se calcula en dos pasos. El primero es el aumento inicial y depende de la clase de estabilidad. El segundo es el aumento gradual y es independiente de la clase de estabilidad.

**Cloudshine:** Radiación gamma proveniente de la pluma.

**Concentración a nivel del suelo.** Se usa para representar la actividad liberada. Cuando el material se deposita en el suelo.

**Contaminación.** Presencia de sustancias radiactivas dentro de una materia o en su superficie, o en el cuerpo humano o en otro lugar en que no sean deseables o pudieran ser nocivas.

**Descontaminación.** Eliminación o reducción de la contaminación por un procedimiento físico o químico.

**Deposición Seca.** La velocidad de deposición es una condición de frontera de transferencia de masa en la interfaz de superficie tierra-atmósfera en modelos de dispersión atmosférica y transporte. La velocidad de deposición se define como un flujo de deposición dividido por la concentración en el aire de material radiactivo.

En realidad, la velocidad de deposición es una función del tamaño de partícula. Cuanto más grande es la partícula, mayor es su velocidad de deposición. De varios experimentos de campo llevados a cabo a lo largo de los años, las velocidades de deposición en seco, van desde 0.001 a 180 cm/s para las partículas.

**Deposición húmeda.** La deposición húmeda a través de la precipitación, agota la pluma en cierto grado. Este fenómeno es difícil de parametrizar debido a su dependencia de las variables físicas de la nube.

El proceso de decaimiento de los isótopos radiactivos es una función del tiempo de transporte y la vida media de cada radionúclido específico que está presente en la pluma.

**Dosis.** Medida de la radiación recibida o 'absorbida' por un blanco. Se utilizan, según el contexto, las magnitudes denominadas dosis absorbida, dosis a un órgano, dosis equivalente, dosis efectiva, dosis equivalente comprometida o dosis efectiva comprometida. Los términos cualitativos se suelen omitir cuando no son necesarios para precisar la magnitud de interés.

**Dosis absorbida.** Magnitud dosimétrica fundamental D, definida por la expresión:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

en la que  $d\varepsilon$  es la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen, y  $dm$  es la masa de la materia existente en el elemento de volumen. La energía puede promediarse con respecto a cualquier volumen definido, siendo la dosis promedio igual a la energía total impartida en el volumen; dividida por la masa del volumen. La unidad de dosis absorbida en el Sistema Internacional (SI) es el joule por kilogramo ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y su nombre es el gray (Gy).

**Dosis absorbida comprometida.** Definida por la expresión:

$$D(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau_0+\tau} D(t) dt$$

donde  $t_0$  es el tiempo de incorporación,  $D(t) dt$  es la tasa de dosis absorbida en el tiempo  $t$ , y  $\tau$  es el tiempo transcurrido desde la incorporación de las sustancias radiactivas. Mientras no se especifique otra cosa, se considerará que  $i$  tiene un valor

de 50 años para los adultos y hasta la edad de 70 años para las incorporaciones en niños.

**Dosis a un órgano.** Dosis media DT en un tejido o un órgano T determinados, del cuerpo humano, definidas por la expresión:

$$D_T = \left(\frac{1}{m_T}\right) \int_{m_T} D dm$$

en la que mT es la masa del tejido u órgano, y D es la dosis absorbida en la masa dm.

**Dosis colectiva (Dosis poblacional).** Expresión de la dosis de radiación total recibida por una población, definida como el producto del número de individuos expuestos a una fuente por su dosis de radiación promedio. La dosis colectiva se expresa en sieverts-hombre (Sv-hombre).

**Dosis comprometida.** Dosis efectiva comprometida y/o dosis equivalente comprometida.

**Dosis efectiva.** Magnitud E, definida por la sumatoria de las dosis equivalentes en tejido, multiplicada cada una por el factor de ponderación para tejido correspondiente:

$$E = \sum_T W_T * H_T$$

expresión en la que HT es la dosis equivalente en el tejido T y WT es el factor de ponderación para tejido correspondiente al tejido T. De la definición de dosis equivalente se desprende que:

$$E = \sum_T W_T * \sum_R W_R * D_{T*R}$$

donde WR es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación R, y DTR la dosis absorbida promedio en el órgano o tejido T. La unidad de dosis efectiva es J·kg<sup>-1</sup>, denominada sievert (Sv).

**Dosis efectiva comprometida.** Magnitud E(τ) definida por la expresión:

$$E(T) = \sum_T W_T * H_T (\tau)$$

Siendo HT (τ) la dosis equivalente comprometida al tejido T a lo largo del período de integración t y WT es el factor de ponderación para tejido correspondiente al

tejido T. Cuando  $i$  no se especifique se considerará que su valor es de 50 años para los adultos y hasta la edad de 70 años para las incorporaciones en niños.

**Dosis equivalente.** Magnitud  $H_{T,R}$  definida por la expresión:

$$H_{TR} = D_{T,R} * W_R$$

en la que  $D_{TR}$  es la dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un tejido u órgano T, y  $W_R$  es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación tipo R.

La unidad de dosis equivalente es J·kg<sup>-1</sup>, denominada sievert (Sv).

**Dosis equivalente comprometida.** Magnitud  $H_T(T)$  definida por la expresión:

$$H_T(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau_0+\tau} H(t) dt$$

donde  $t_0$  es el tiempo de incorporación,  $H_T(t)$  es la tasa de dosis equivalente en el tiempo  $t$  en un órgano o tejido T y  $\tau$  es el tiempo transcurrido desde la incorporación de las sustancias radiactivas. Cuando  $\tau$  no se especifica se considera que su valor es de 50 años para los adultos y hasta la edad de 70 años para las incorporaciones en niños.

**Dosis proyectada.** La dosis que es de esperar si no se realiza ninguna acción protectora o reparadora.

**Efecto determinista.** Efecto de la radiación para el que existe por lo general un nivel umbral de dosis por encima del cual la gravedad del efecto aumenta al elevarse la dosis.

**Efectos estocásticos de la radiación.** Efectos de la radiación, que se producen por lo general sin un nivel de dosis umbral, cuya probabilidad es proporcional a la dosis y cuya gravedad es independiente de la dosis.

**Exposición.** Acto o situación de estar sometido a irradiación. La exposición puede ser externa (irradiación causada por fuentes situadas fuera del cuerpo humano), o interna (irradiación causada por fuentes existentes dentro del cuerpo humano). La exposición puede clasificarse en normal o potencial; ocupacional, médica o del público; así como, en situaciones de intervención, en exposición de emergencia o crónica. También se utiliza el término exposición en radiodosimetría para indicar el grado de ionización producido en el aire por la radiación ionizante.

**Exposición aguda.** Para referirse a exposiciones lo suficientemente cortas para ser consideradas como instantáneas (menos de una hora).

**Exposición crónica.** Exposición persistente en el tiempo.

**Exposición del público.** Exposición sufrida por miembros del público a causa de fuentes de radiación, excluidas cualquier exposición ocupacional o médica y la exposición a la radiación natural de fondo normal en la zona, pero incluida la exposición debida a las fuentes y prácticas autorizadas y a las situaciones de intervención.

**Exposición ocupacional.** Toda exposición de los trabajadores sufrida durante el trabajo, con excepción de las exposiciones excluidas del ámbito de las Normas y de las exposiciones causadas por las prácticas o fuentes exentas con arreglo a las Normas.

**Exposición potencial.** Exposición que no se prevé se produzca con seguridad, pero que puede ser resultado de un accidente ocurrido en una fuente o deberse a un suceso o una serie de sucesos de carácter probabilista, por ejemplo a fallos de equipo y errores de operación.

**Factor de Reducción de Dosis (DFR).** Son aplicados solo para dosis recibidas a partir de radionúclidos inhalados o internamente depositados. Ajustan la efectividad de dosis internas como una función del período de tiempo en el que la dosis es recibida.

**Factor de ponderación de la radiación.** Factor utilizado con fines de protección radiológica, por el que se multiplica la dosis absorbida con objeto de tener en cuenta la eficacia relativa de los diferentes tipos de radiación para inducir efectos sobre la salud.

**Factor de ponderación del tejido.** Factor utilizado con fines de protección radiológica, por el que se multiplica la dosis equivalente recibida por un órgano o un tejido, para tener en cuenta la diferente sensibilidad de los distintos órganos y tejidos en cuanto a la inducción de efectos estocásticos de la radiación.

**Groundshine:** Radiación gamma de partículas depositadas en el suelo después de la lluvia radiactiva.

**Hipotiroidismo.** La glándula tiroides no es capaz de producir suficiente hormona tiroidea para mantener el cuerpo funcionando de manera normal, como consecuencia de un exceso de yodo.

**Instalación Nuclear.** Planta de fabricación de combustible nuclear, reactores nucleares (tanto un conjunto crítico como uno subcrítico), reactor de investigación, central nuclear, instalación de almacenamiento de combustible gastado, planta de enriquecimiento e instalación de reprocesado.

**Límite de dosis.** Valor de la dosis efectiva o de la dosis equivalente causada a los individuos por prácticas controladas, que no se deberá rebasar.

**Mecanismos de elevación de la pluma.** Dos procesos físicos pueden impulsar verticalmente una pluma neutra flotante a un nivel superior al suelo desde su punto inicial de liberación. Ambos mecanismos se llaman elevación de la pluma. El primer mecanismo se denomina aumento de momento de la pluma, en el que la velocidad de la liberación impulsa verticalmente la pluma debido al exceso de momento de la liberación. El otro mecanismo de elevación de la pluma es a través de la flotabilidad. La elevación de la pluma por flotabilidad ocurre si la temperatura de la pluma liberada es más cálida que el aire ambiente.

**Nivel de actuación.** Nivel de la tasa de dosis o de la concentración de la actividad por encima del cual deberían adoptarse acciones reparadoras o acciones protectoras en situaciones de exposición crónica o de exposición de emergencia.

**Nivel de intervención.** Nivel de dosis evitable al alcanzarse el cual se realiza una acción protectora o una acción reparadora específica en una situación de exposición de emergencia o en una situación de exposición crónica.

**Percentil de Consecuencia 95.** Un nivel estadístico de consecuencia que es excedido por no más del 5% del tiempo basado en la meteorología característica del sitio. Las bases para la exposición radiológica fuera de sitio están documentadas en el apéndice A del DOE-STD-3009-94 y basado en el método descrito en la Guía Reglamentaria 1.145 de la Comisión Nuclear reguladora de los EE.UU. (febrero de 1983) para definir las condiciones meteorológicas asumidas para ser presentadas en el análisis de consecuencias. Dada la información específica del sitio, el PERCENTIL 95 de la consecuencia se determina a partir de la distribución de dosis basadas en la meteorología, calculadas para una liberación postulada a una ubicación receptora a favor del viento. Las características meteorológicas específicas o factores de dilución que conducen a esta dosis son una función de la elevación de la liberación, la distancia al receptor y (para un cierto grato) la duración de la liberación. Este nivel de consecuencia es independiente de la dirección, es decir, promedio de todos los sectores a la distancia de interés.

**Parámetro de dispersión(x/Q).** Parámetro de dispersión atmosférica. Este parámetro aparece en el cálculo de la dosis radiológica para un receptor ubicado in situ en los análisis de seguridad de las instalaciones nucleares del DOE. Representa la concentración relativa de la pluma mientras viaja a sotavento desde un punto de liberación, donde X es la concentración del contaminante en el aire ( $Bq/m^3$  o  $g/m^3$ ) o la concentración integrada en el tiempo ( $Bqs/m^3$  o  $g-s/m^3$ ) y Q es la velocidad de liberación constante del contaminante o fuente total ( $Bq/s$  o  $g/s$ ).

**Percentil de Consecuencia 99.5, Peor Sector.** Un método descrito en la Guía Reglamentaria 1.145 de la Comisión Nuclear Reguladora de los EE.UU. para definir las condiciones meteorológicas que se supone presentes en el Análisis de Consecuencias. Dados los datos específicos del sitio, el sector meteorológico del percentil 99.5 es el conjunto de condiciones meteorológicas asumidas durante una liberación postulada a una ubicación receptora a favor del viento, que daría lugar a



una dosis que excede el 0.5% del tiempo (basado en un promedio anual) en uno de los 16 sectores. El más alto de los 16 sectores se define como el percentil 99.5, peor sector meteorológico/condición de consecuencia. Este nivel de consecuencia es entonces basado en la dirección y tiende a exceder el percentil de consecuencia 95 más allá de una milla para la mayoría de los sitios. La consideración de la dosis de MOI toma en cuenta la distancia al límite del sitio en cada dirección.

**Pluma meandro.** Factor de expansión calculado para el efecto de serpenteo durante el transporte de la pluma, se calcula el ensanchamiento de la pluma en dirección del viento cruzado.

Los cambios en la dirección del viento se vuelven probables con el tiempo y la nube tenderá a cambiar de dirección, o meandro. El factor meandro es especialmente importante para liberaciones de mayor duración. Para un receptor que permanece sumergido en la pluma por algún tiempo, el cambio de dirección ensancha efectivamente la pluma (es decir, aumenta la dispersión horizontal) y por lo tanto disminuye el parámetro de dispersión  $x/Q$ .

**Profilaxis Radiológica.** Cuando una persona toma yoduro de potasio, el yodo estable en el medicamento es absorbido por la tiroides. La tiroides “se llena” de yoduro estable y no puede absorber más ni estable ni radiactivo durante 24 horas.

**Radiación ionizante.** A los efectos de la protección radiológica, la radiación capaz de producir pares de iones en materia(s) biológica(s).

**RBE (Eficiencia biológica relativa).** Los valores de RBE son una función del tipo de radiación absorbida y el órgano específico. RBE es definido con datos biológicos obtenidos de experimentos en laboratorio o estudios epidemiológicos. La misma dosis de distintos tipos de radiación no producen, sin embargo, los mismos efectos biológicos, debido al patrón de depósito de energía a escala microscópica.

**Resuspensión.** La deposición se dirige a la transferencia de masa desde la pluma a la superficie del suelo. Los procesos de resuspensión son esencialmente lo opuesto a los procesos de deposición, en los que el material que ya ha sido depositado desde la pluma, o que ha estado en el suelo por un período de tiempo, es reincorporado por el viento. Este reencadenamiento y liberación desde el suelo, en partículas se denomina resuspensión. Las partículas se reintroducen en la atmósfera donde se pueden transportar a una nueva ubicación.

**Riesgo.** Magnitud multiatributiva con la que se expresa un riesgo en sentido general, peligro o posibilidad de consecuencias nocivas o perjudiciales vinculadas a exposiciones reales o potenciales. Guarda relación con magnitudes tales como la probabilidad de determinadas consecuencias dañinas y la amplitud y el carácter de tales consecuencias.

**Rugosidad de la superficie.** La rugosidad de la superficie afecta la magnitud de la turbulencia en su mayoría vertical, y, por lo tanto, dispersión atmosférica vertical.



Cuanto más rugosa es la superficie de la región de transporte, mayores turbulencias se forman cuando la pluma se encuentra con la superficie de la tierra.

**Tiroiditis.** Inflamación de la Glándula Tiroides.

**Vías de exposición.** Vías por las que una materia radiactiva puede llegar a los seres humanos o irradiarlos.

**Zona controlada.** Zona controlada es toda zona en la que son o pudieran ser necesarias medidas de protección y disposiciones de seguridad específicas para: a) controlar las exposiciones normales o prevenir la dispersión de contaminación en las condiciones normales de trabajo; b) prevenir las exposiciones potenciales, o limitar su magnitud.

**Zona supervisada.** Toda zona no definida como zona controlada pero en la que se mantienen bajo vigilancia las condiciones de exposición ocupacional, aunque normalmente no sean necesarias medidas protectoras ni disposiciones de seguridad concretas.

## REFERENCIAS

- [1] KUMAMOTO, H. (2007). SATISFYING SAFETY GOALS BY PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT, LONDON: SPRINGER-VERLAG LONDON LIMITED.
- [2] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, OFFICE OF ENVIRONMENT, HEALTH, SAFETY AND SECURITY. (2015). *TECHNICAL REPORT FOR CALCULATIONS OF ATMOSPHERIC DISPERSION AT ONSITE LOCATIONS FOR DEPARTMENT OF ENERGY NUCLEAR FACILITIES*. OBTENIDO DE: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f22/Technical-Report-for%20-Calculations-of-Atmospheric-Dispersion-at-Onsite-Locations-for-DOE-NuclearFacilities.pdf> [CONSULTA: JUNIO, 2018]
- [3] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (2009). *ACCIDENT CONSEQUENCE ANALYSIS P-301*, BETESHEDA, MD, USA.
- [4] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, (2017). *ASME/ANS RA-S-1.3-2017: STANDARD FOR RADIOLOGICAL ACCIDENT OFFSITE CONSEQUENCE ANALYSIS (LEVEL 3 PRA) TO SUPPORT NUCLEAR INSTALLATION APPLICATIONS*.
- [5] DINUNNO, J. ET, AL. (ABRIL, 1992). *DOCUMENTO DE INFORMACIÓN TÉCNICA 14844, CÁLCULO DE FACTORES DE DISTANCIA PARA REACTORES DE POTENCIA Y PRUEBA*. OBTENIDO DE: <https://www.nrc.gov/docs/ML0217/ML021750625.pdf> [CONSULTA: FEBRERO, 2018]
- [6] INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS, DIVISIÓN DE ENERGÍAS ALTERNAS, GERENCIA DE ENERGÍA NUCLEAR, (NOVIEMBRE, 2014). *INFORME TÉCNICO FINAL DE LA ACTUALIZACIÓN DEL EXAMEN INDIVIDUAL DE PLANTA NIVEL 2 DE LA CENTRAL LAGUNA VERDE U-1 (FASE II)*.
- [7] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, OFFICE OF ENVIRONMENT, SAFETY AND HEALTH. (2004). *MACCS2 COMPUTER CODE APPLICATION GUIDANCE FOR DOCUMENTED SAFETY ANALYSIS FINAL REPORT*, WASHINGTON, DC. OBTENIDO DE: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/07/f2/Final\\_MACCS2\\_Guidance\\_Report\\_June\\_1\\_2004.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/07/f2/Final_MACCS2_Guidance_Report_June_1_2004.pdf) [CONSULTA: MAYO, 2018]
- [8] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (2009). *EMERGENCY CLASSIFICATION*. OBTENIDO DE: <https://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/about-emerg-preparedness/emerg-classification.html> [CONSULTA: MAYO, 2018]
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. *INES, ESCALA INTERNACIONAL DE SUCESOS NUCLEARES Y RADIOLÓGICOS*, DISPONIBLE EN: [https://www.iaea.org/sites/default/files/ines\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/ines_sp.pdf) [CONSULTA: MARZO, 2018]
- [10] RADIOACTIVITY.EU.COM. (FEBRERO, 2018). *QUESTION OF DOSES, DOSES SCALE*. OBTENIDO DE: [http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Doses\\_Classification.htm](http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Doses_Classification.htm) [CONSULTA: FEBRERO, 2018]
- [11] SECRETARIA DE GOBERNACIÓN, (14 DE AGOSTO, 2015). *PLAN DE EMERGENCIA RADIOLÓGICA EXTERNO, DELIMITACIÓN DE ZONAS*. OBTENIDO DE: [http://www.pere.proteccioncivil.gob.mx/en/PERE/Delimitacion\\_de\\_las\\_zonas\\_n](http://www.pere.proteccioncivil.gob.mx/en/PERE/Delimitacion_de_las_zonas_n) [CONSULTA: FEBRERO, 2018]
- [12] SECRETARIA DE SALUD DEL ESTADO DE VERACRUZ. (2017). *PLAN DE EMERGENCIA RADIOLÓGICO EXTERNO (PERE)*, XALAPA, VERACRUZ. OBTENIDO DE:

<https://www.ssaver.gob.mx/riesgos-sanitarios/files/2015/08/PERE.pdf> [CONSULTA: FEBRERO, 2018]

[13] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (AGOSTO, 2017). *TÍTULO 10 CÓDIGO FEDERAL DE REGULACIONES PARTE 100 (10 CFR PARTE 100), SUB 11 DETERMINATION OF EXCLUSION AREA, LOW POPULATION ZONE AND POPULATION CENTER DISTANCE*. OBTENIDO DE: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part100/part100-0011.html> [CONSULTA: ABRIL, 2018]

[14] G.A. BRIGGS, (1973), *LIFT OFF BUOYANT GAS INITIALLY ON THE GROUND, ADTL CONTRIBUTION FILE NO. 87*. AIR RESOURCES ATMOSPHERIC TURBULENCE AND DIFFUSION LABORATORY NOAA, OAK RIDGE, TN.

[15] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. OFFICE OF NUCLEAR REGULATORY RESEARCH (2014). *NUREG-CR-7009, MACCS BEST PRACTICES AS APPLIED IN THE STATE-OF-THE-ART REACTOR CONSEQUENCE ANALYSES (SOARCA) PROJECT*. WASHINGTON, DC.

[16] LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY. (01 MAYO, 2013). *HOTSPOT USER'S GUIDE, HEALTH PHYSICS CODES VERSION 3.0*.

[17] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (MAYO, 1994). *NUREG-CR 6094, CALCULATIONS IN SUPPORT OF A POTENCIAL DEFINITION OF LARGE RELEASE*. WASHINGTON, DC.

[18] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. (SEPTIEMBRE, 2016). *EARLY-PHASE HEALTH EFFECTS*. BETHESDA, MD, USA.

[19] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (NOVIEMBRE, 1988). *CARTA GENÉRICA 88-20. INDIVIDUAL PLAN EXAMINATION FOR SEVERE ACCIDENT VULNERABILITIES- 10 CFR 50.54 (F)*.

[20] DEPARTMENT OF ENERGY, UNITED STATES OF AMERICA. (DICIEMBRE, 1990). *FINAL ENVIRONMENTAL IMPACT STATEMENT, CONTINUED OPERATION OF K-L, AND REACTORS SAVANNAH RIVER SITE AIDEN, SOUTH CAROLINA*. OBTENIDO DE: [https://books.google.com.mx/books?id=4vUxQAAMAAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=4vUxQAAMAAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) [CONSULTA: JUNIO, 2018]

[21] KLIMA-UNK ENERGIEFONDS. (DICIEMBRE, 2012). *FLEXIBLE TOOLS FOR ASSESSMENT OF NUCLEAR RISK IN EUROPE*. DISPONIBLE EN: <http://flexrisk.boku.ac.at/en/index.html> [CONSULTA: JUNIO, 2018]

[22] INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES. (2015). *NUCLEAR AND RADIOLOGICAL EMERGENCY GUIDELINES: PREPAREDNESS, RESPONSE AND RECOVERY*. OBTENIDO EN: <http://www.ifrc.org/Global/Documents/Secretariat/201602/1296000-NuclearRadio.Emer.Guide-Int-EN-LR.pdf> [CONSULTA: JUNIO, 2018]

[23] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. *GLOSARIO DE LA OIEA*. OBTENIDO DE: <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc2650/doc2650.htm> [CONSULTA: JUNIO, 2018]

[24] MAZZAMMAL, H. (2014). *ESTIMATION OF INTERVENTION DISTANCES FOR URGENT PROTECTIVE ACTIONS USING COMPARATIVE APPROACH OF MACCS AND INTERAS, EN HINWAI PUBLISHING CORPORATION*. VOLUMEN 2014, ID DEL ARTÍCULO 874134, 5 PÁGINAS.

[25] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (DICIEMBRE, 2009). *USER'S GUIDE AND REFERENCE MANUAL FOR WINMACCS, A MACCS INTERFACE FOR CALCULATION HEALTH*

*AND ECONOMIC CONSEQUENCES FROM ACCIDENTAL RELEASE OF RADIOACTIVE MATERIALS INTO THE ATMOSPHERE.* WASHINGTON, D.C.

[26] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (DICIEMBRE, 1990). *NUREG-1150: SEVERE ACCIDENT RISKS: AN ASSESSMENT FOR FIVE U.S. NUCLEAR POWER PLANTAS.* OBTENIDO DE: <https://www.nrc.gov/docs/ML1209/ML120960691.pdf> [CONSUTA: JULIO, 2018]

[27] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (1979). *FSAR, FINAL SAFETY ANALYSES REPORT, LAGUNA VERDE NUCLEAR POWER STATION UNITS.* MÉXICO.

[28] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, (AGOSTO 1985). *PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT COURSE DOCUMENTATION.* WASHINGTON, D.C., VOLUMEN 7.

## APÉNDICE

Número de casos: Efectos Tempranos a la Salud (Vómito prodrómico, diarrea, hipotiroidismo, eritema, cáncer de pulmón, seno, hueso, leucemia, tiroides)

### CASOS EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD “ACCIDENTE MÁXIMO CREÍBLE”

CASOS EFECTOS DE TEMPRANOS A LA SALUD	DISTANCIAS	PROBABILIDAD	PROMEDIO
ERL INJ/PRODROMAL VOMIT	1.2-80.5 km	0.6168	5.13E+00
ERL INJ/DIARRHEA	1.2-80.5 km	0.978	1.24E+01
CAN FAT/LUNG	1.2-80.5 km	1	1.15E+01
CAN FAT/THYROID	1.2-80.5 km	1	3.24E+00
CAN FAT/SENO	1.2-80.5 km	1	6.67E+00
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-80.5 km	1	7.73E-01
CAN FAT/BONE	1.2-80.5 km	1	1.15E+01
ERL INJ/HYPOTHYROIDISM	1.2-80.5 km	0.978	2.46E+00
ERL INJ/PRODROMAL VOMIT	1.2-16.1 km	0.6168	5.13E+00
ERL INJ/DIARRHEA	1.2-16.1 km	0.978	1.24E+01
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-16.1 km	1	3.31E+00
CAN FAT/THYROID	1.2-16.1 km	1	1.80E+00
ERL INJ/PRODROMAL VOMIT	1.2-4.0 km	0.6167	5.13E+00
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-4.0 km	0.3297	5.15E-02
ERL INJ/SKIN ERYTHEMA	1.2-4.0 km	0.7818	2.76E+01

Tabla 58 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Accidente Máximo Creíble”

**CASOS EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD “LIBERACIÓN SUPERIOR AL 10% DE INVENTARIO INICIAL DE Cs-I”**

CASOS DE EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD	DISTANCIAS	PROBABILIDAD	PROMEDIO
ERL INJ/PRODRIMAL VOMIT	1.2-80.5 km	0.3365	3.23E-01
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-80.5 km	0.141	2.41E-03
CAN FAT/THYROID	1.2-80.5 km	1	1.39E+00
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-80.5 km	1	2.52E+00
ERL INJ/PRODRIMAL VOMIT	1.2-16.1 km	0.3365	3.23E-01
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-16.1 km	0.141	2.41E-03
ERL INJ/SKIN ERYTHEMA	1.2-16.1 km	0.4563	9.45E+00
CAN FAT/THYROID	1.2-16.1 km	1	6.86E-01
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-16.1 km	1	1.06E+00
ERL INJ/PRODRIMAL VOMIT	1.2-4.0 km	0.3365	3.23E-01
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-4.0 km	0.141	2.41E-03
ERL INJ/SKIN ERYTHEMA	1.2-4.0 km	0.4563	9.13E+00
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-4.0 km	0	0.00E+00
CAN FAT/LUNG	1.2-4.0 km	1	9.54E-01

**Tabla 59 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Liberación superior al 10%”**

**CASOS EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD “LIBERACIÓN SUPERIOR AL 1% E INFERIOR AL 10%”**

<b>CASOS DE EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD</b>	<b>DISTANCIAS</b>	<b>PROBABILIDAD</b>	<b>PROMEDIO</b>
ERL INJ/PRODROMAL VOMIT	1.2-80.5 km	0.3283	1.86E-01
ERL INJ/HYPOTHYROIDISM	1.2-80.5 km	0.5139	1.43E-01
CAN FAT/THYROID	1.2-80.5 km	1	7.96E-01
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-80.5 km	1	1.37E+00
ERL INJ/PRODROMAL VOMIT	1.2-16.1 km	0.3283	1.86E-01
ERL INJ/HYPOTHYROIDISM	1.2-16.1 km	0.5139	1.43E-01
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-16.1 km	0.0227	5.84E-05
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-16.1 km	1	5.19E-01
CAN FAT/THYROID	1.2-16.1 km	1	3.69E-01
ERL INJ/PRODROMAL VOMIT	1.2-4.0 km	0.3283	1.86E-01
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-4.0 km	0.0227	5.84E-05
ERL INJ/SKIN ERYTHEMA	1.2-4.0 km	0.3628	3.60E+00
CAN INJ/LEUKEMIA	1.2-4.0 km	0.00E+00	0.00E+00
CAN FAT/LUNG	1.2-4.0 km	1	4.84E-01

**Tabla 60 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Liberación superior 1% inferior 10%”**

### CASOS EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD “LIBERACIÓN INFERIOR AL 1%”

CASOS DE EFECTOS TEMPRANOS A LA SALUD	DISTANCIAS	PROBABILIDAD	PROMEDIO
ERL INJ/PRODRIMAL VOMIT	1.2-80.5 km	0	0.00E+00
ERL INJ/HYPOTHYROIDISM	1.2-80.5 km	0.141	8.00E-04
CAN FAT/THYROID	1.2-80.5 km	1	9.75E-02
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-80.5 km	1	1.61E-01
CAN FAT/BONE	1.2-80.5 km	1	1.82E-02
ERL INJ/PRODRIMAL VOMIT	1.2-16.1 km	0	0.00E+00
ERL INJ/HYPOTHYROIDISM	1.2-16.1 km	0.141	8.00E-04
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-16.1 km	0	0.00E+00
CAN FAT/LEUKEMIA	1.2-16.1 km	1.00E+00	5.57E-02
CAN FAT/THYROID	1.2-16.1 km	1	4.28E-02
ERL INJ/PRODRIMAL VOMIT	1.2-4.0 km	0	0.00E+00
ERL INJ/THYROIDITIS	1.2-4.0 km	0.00E+00	0.00E+00
ERL INJ/SKIN ERYTHEMA	1.2-4.0 km	0.00E+00	0.00E+00
CAN INJ/LEUKEMIA	1.2-4.0 km	0	0.00E+00
CAN FAT/LUNG	1.2-4.0 km	1	4.45E-02

Tabla 61 Casos de Efectos Tempranos a la salud “Liberación inferior al 1%”