MÓDULO 7:

PREDICCIÓN DE IMPACTOS RADIOLÓGICOS

7.1 DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA Y DEPOSICIÓN DEL MATERIAL RADIACTIVO

7.2 EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

7.3 ANALISIS DE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN DEL PÚBLICO A LA RADIACIÓN

Profesores: D. Carlos de Vera López
Dª. Aranzazu García Monedero
PROINSA

7.1 DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA Y DEPOSICIÓN DEL MATERIAL RADIACTIVO

Objetivos

Con este tema, se pretende que tanto el personal de apoyo en la toma de decisiones como los expertos responsables de supervisión radiológica y de la elaboración del pronóstico de las consecuencias ambientales conozcan la naturaleza de la dispersión atmosférica y de la deposición y tengan un conocimiento básico de los métodos usados para medir los distintos parámetros meteorológicos y de los modelos aplicados en la estimación del efecto de las condiciones meteorológicas en las consecuencias de accidente.

Los participantes también tendrán una idea básica de los fenómenos y factores que causan incertidumbres en los cálculos de dispersión atmosférica.

Contenidos

- Bases de la dispersión atmosférica.
- Observaciones meteorológicas dentro del emplazamiento e intercambio de datos.
- Redes meteorológicas internacionales, nacionales y regionales e intercambio de datos.
- Acuerdos internacionales para cálculos de dispersión en caso de accidentes nucleares.
- Influencia de factores estacionales y de la topografía.
- Limitaciones e incertidumbres.

7.1.1. BASES DE LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Las condiciones meteorológicas predominantes juegan un importante papel cuando se está considerando el riesgo al que puede estar sometida la población ante una emisión o liberación de sustancias radiactivas a la atmósfera.

El material que se emite a la atmósfera es transportado por el viento, extendido y diluido por procesos de difusión atmosférica (difusión turbulenta) y depositado en la superficie terrestre por deposición húmeda y seca. Las condiciones meteorológicas también determinan, en parte, la elevación inicial del penacho.

Turbulencias

Las turbulencias atmosféricas se manifiestan como fluctuaciones aparentemente arbitrarias en las tres componentes de velocidad de viento. Cuanto mayores sean las

turbulencias, los contaminantes se mezclarán y diluirán de forma más rápida y efectiva.

Las turbulencias se deben a la estructura vertical de la **temperatura** en la atmósfera (o perfil de temperatura), a los efectos mecánicos de la orografía y otros elementos que interaccionan con el flujo de aire (la **'rugosidad'** del suelo) y la variación de la **velocidad** del viento con la altura. En algunos casos -en nubes convectivas, por ejemplo- la humedad también puede tener su importancia.

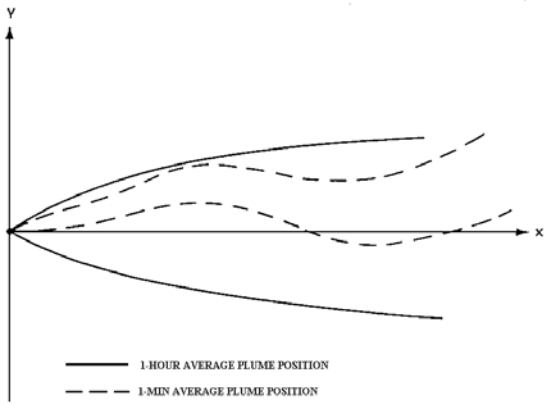

Figura 1. Representación del penacho instantáneo y su envolvente como promedio en una hora

Para una distancia determinada de la fuente de emisión, según aumenta el tiempo de observación, la anchura del penacho se hace mayor debido a su mendreo y como consecuencia las concentraciones máximas disminuyen con el tiempo.

Dispersión Turbulenta:

El efecto de las turbulencias en relación a una hipotética bolsa de contaminación emitida a la atmósfera se manifiesta de la forma siguiente: los torbellinos o fluctuaciones turbulentas de mayor tamaño empujan, trasladan o sacuden al azar la bolsa de contaminación. Los torbellinos de escala similar a la bolsa la estiran, la deforman y terminan por fraccionarla en bolsas irregulares más pequeñas; éstas a su vez se someten a la acción de los torbellinos de escala más pequeña que las desgajan nuevamente y así sucesivamente hasta llegar a la difusión a escala molecular donde termina el proceso.

Estabilidad térmica

Si un perfil de temperatura (representación gráfica del Gradiente G de variación de la temperatura con la altura; $G = \Delta T/\Delta h$) es igual al perfil adiabático seco (donde G es aprox. -1 °C/100 m), la capa de aire en cuestión tiene una estabilidad térmica neutra.

En otras palabras, en condiciones neutras una masa de aire que se traslada adiabáticamente hacia arriba o hacia abajo, siempre permanece en equilibrio térmico con el aire circundante.

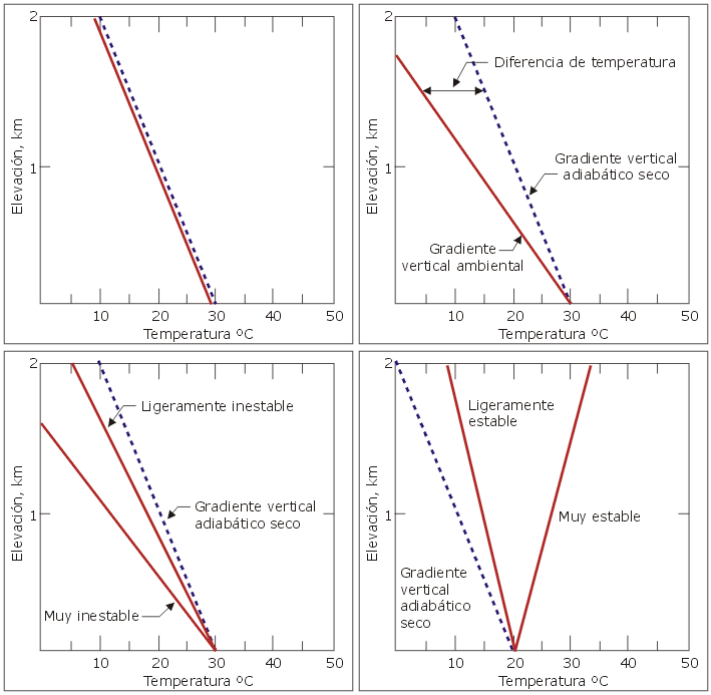

Figura 2. Gradiente adiabático seco. Condiciones atmosféricas.

Si la temperatura disminuye con la altura a un ritmo menor (negativo) que $G_{adiabático}$, el perfil de temperatura tiende a oponerse a cualquier movimiento vertical. Entonces la capa de aire es **estable**. Una capa de aire en la que no se produzca ninguna variación de temperatura con la variación en altura se describe como **isotérmica**, mientras que una capa en la que la temperatura aumenta con la altura se denomina **inversión**. Por último, si se observa que la temperatura disminuye con la altura a un ritmo mayor (negativo) que $G_{adiabático}$ (como en tardes soleadas de verano, por ejemplo), todas las fluctuaciones generadas mecánicamente se amplifican y la atmósfera se dice que es **inestable** (superadiabática).

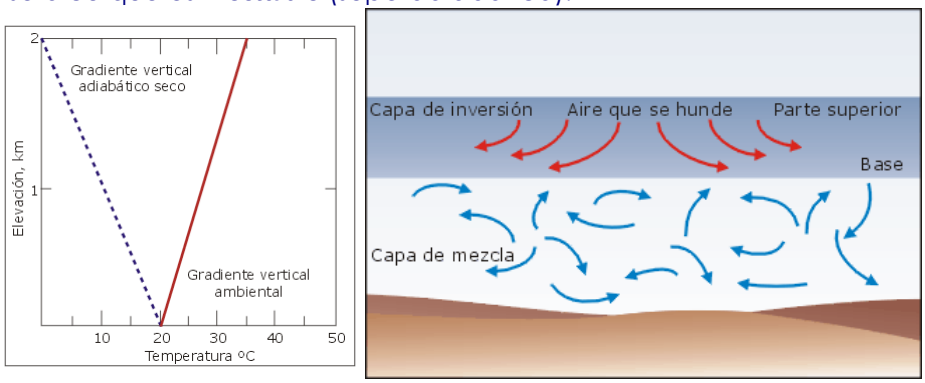

Figura 3. Inversión Térmica.

NOTA: Se denomina expansión adiabática a un proceso termodinámico en el cual un gas se hace pasar de una presión mayor a otra inferior sin que tome o ceda calor al medio, realizando un trabajo sobre su entorno y bajando su temperatura. No debe confundirse con intercambio de calor que, por definición de proceso adiabático, es nulo.

Estructura de la baja atmósfera

Denominamos Troposfera a la capa de la atmósfera más próxima a la superficie de la tierra. Esta capa tiene una altura de aproximadamente 10 Km. (en Europa). A continuación, separada por la tropopausa, encontramos la siguiente capa en la que se divide la atmósfera, la Estratosfera.

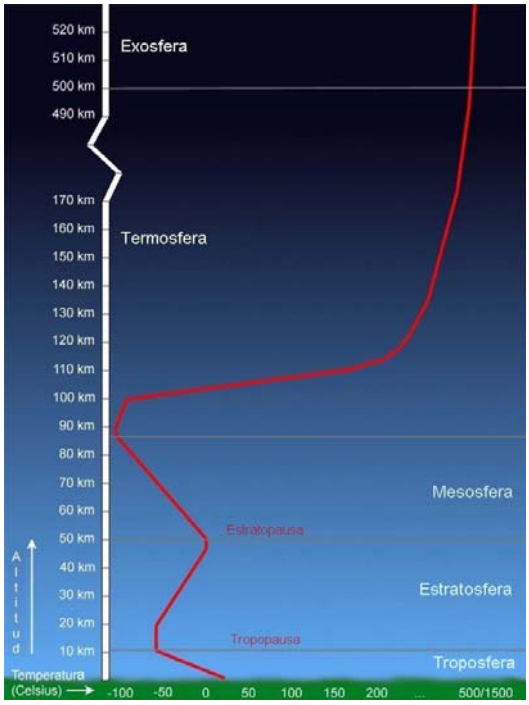

Figura 4 Estructura de la atmósfera

La **troposfera** es, en general, térmicamente estable, ya que el gradiente de temperatura es menor (negativo) que $G_{adiabático}$.

Sin embargo, cerca de la superficie, dentro de la **Capa Límite Atmosférica** (CLA) esta condición está perturbada por el intercambio de calor con la superficie de la tierra.

La **estratosfera** es extremadamente estable (la temperatura incrementa con la altura).

La **tropopausa** (unos pocos kilómetros), con su prácticamente estructura isoterma, forma una barrera que impide el movimiento de contaminantes entre la troposfera y la estratosfera.

La CLA es la región donde la atmósfera experimenta los efectos producidos por los intercambios con la superficie de la tierra: pérdida de momento, calor y humedad. En consecuencia, la CLA es de naturaleza turbulenta y, por consiguiente, opuesta al régimen laminar, más estable, de la 'atmósfera libre' que se encuentra por encima de ella.

La profundidad de la Capa Límite Atmosférica depende del tipo de superficie, de la hora del día (insolación), y también de la trayectoria que haya seguido el flujo de aire. Por lo general, su espesor varía desde unos pocos cientos de metros a un par de kilómetros. En la mayoría de las situaciones la CLA es igual a la denominada capa de mezcla. El espesor de esta capa es un concepto importante en los cálculos de dispersión atmosférica: por lo general nos indica la máxima altura que alcanzará un volumen de aire que contenga contaminantes.

La capa de aire situada inmediatamente por encima del suelo constituye la **capa superficial** que se caracteriza por flujos de calor y momento aproximadamente constantes. Su profundidad varía de una séptima a una décima parte del espesor de la CLA.

El comportamiento de la masa de aire atmosférico en un determinado lugar depende de las interacciones que puedan ocurrir desde el punto de vista sinóptico, meso o micrometeorológico. Dependiendo de la escala del fenómeno predominante serán distintos los efectos producidos.

Escala sinóptica
La escala sinóptica es aquella que comprende grandes superficies, pudiendo llegar incluso a la escala continental. En ella se estudia la evolución de las bajas y altas presiones, frentes fríos y calientes, etc y es apropiada la utilización de mapas meteorológicos. Las fuerzas de Coriolis y el gradiente de presión son dos ejemplos típicos de fenómenos en escala sinóptica.

Mesoescala
En la mesoescala se estudian los efectos meteorológicos producidos es sistemas más pequeños que la escala sinóptica. Sus dimensiones horizontales generalmente oscilan alrededor de varias decenas de km. Algunos ejemplos de sistemas de mesoescala meteorológica son las interacciones de brisa mar-tierra, canalizaciones de viento en los valles, vientos catabáticos y anabáticos, efecto de isla térmica, etc.

Microescala
Los fenómenos de microescala afectan áreas muy pequeñas y son de muy corta duración. Son efectos más "locales".

Velocidad y dirección del viento

La velocidad y la dirección del viento horizontal varían con la altura debido a que la resultante de las distintas fuerzas que actúan sobre un volumen pequeño de aire cambia con la altura. En las capas superiores de la troposfera (por encima de la CLA), las corrientes de aire las controlan principalmente las diferencias de presión y las fuerzas de Coriolis (fuerza desviadora debida a la rotación de la tierra).

El viento resultante de estas dos fuerzas en equilibrio se denomina viento **geostrófico**. El viento geostrófico es directamente proporcional al incremento de presión e inversamente proporcional a la distancia de las isobaras (es paralelo a las isobaras rectilíneas).

Cerca de la superficie terrestre (en la CLA) las fuerzas de fricción son muy importantes ya que no sólo reducen la velocidad del viento cerca de la superficie sino que provocan que gire en sentido contrario a las agujas del reloj respecto al viento geostrófico. El ángulo depende del estado de la atmósfera, variando desde 5º a 10º en condiciones inestables a unos 30º a 50º en atmósfera estable.

En las proximidades de la superficie, en condiciones neutras, la velocidad del viento aumenta con la altura de acuerdo con una ley logarítmica, sin embargo, en atmósferas estables e inestables esa relación es más compleja. A veces se realizan aproximaciones siguiendo una función potencial. A alturas superiores a la capa superficial la situación es generalmente más difícil de analizar. Puede que incluso en algunas ocasiones aparezcan corrientes en chorro fuertes y estrechas a baja altura cuyo origen no es siempre fácil de explicar.

Clasificación de la estabilidad atmosférica

Muchos de los sistemas de clasificación de estabilidad atmosférica que se utilizan están basados en el modelo de clasificación de Pasquill (desarrollado originalmente en los años sesenta) y en sus categorías de estabilidad atmosférica, que varía entre *condiciones extremadamente inestables* (A) y *condiciones moderadamente estables* (F). A lo largo del tiempo han surgido una multitud de variaciones del esquema inicial (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones Meteorológicas que definen las Categorías de Estabilidad según Pasquill

Categorías de Estabilidad Atmosférica			
A:	Extremadamente inestable	**D:**	Neutra
B:	Moderadamente inestable	**E:**	Ligeramente estable
C:	Ligeramente inestable	**F:**	Moderadamente estable

Velocidad del viento a 10m [m s^{-1}]	**Día insolación**			**Condiciones nocturnas**	
	Fuerte	**Moderada**	**Ligera**	**Nubosidad Fina (ó ≥ 4/8 nubes bajas)**	**≤ 3/8 de nubosidad**
< 2	A	A - B	B	-	-
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 4	B	B - C	C	D	E
4 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

En la estimación de la categoría de estabilidad, se sustituye a menudo la insolación solar por los valores del gradiente vertical de temperatura. La clasificación de la estabilidad se ha relacionado también con la desviación típica de la dirección horizontal (o vertical) del viento y con el gradiente térmico de la atmósfera (tabla 2), y se han introducido modificaciones para tener en cuenta el efecto de la rugosidad de la superficie y los diferentes tiempos de observación. En algunos países el sistema ha sido modificado para incluir el efecto de la capa de nieve en el invierno.

Ocasionalmente se añade a esta clasificación una séptima categoría *extremadamente estable* (letra **G**). Dada esta extremada estabilidad, generalmente con vientos de baja velocidad, hay que tener en cuenta el hecho de que aunque la difusión turbulenta sea muy débil, el serpenteo del penacho y los cambios en la dirección de viento pueden ser muy grandes. Como consecuencia de ello, el tiempo promedio de propagación de un penacho puede ser similar al que ocurriría en casi cualquier otra clase de estabilidad atmosférica.

La estabilidad atmosférica vertical y horizontal no siempre representan la misma categoría. Además, también se produce difusión turbulenta en la dirección del viento, efecto que no suele ser considerado muchas veces en emisiones continuas.

Existen fórmulas matemáticas y gráficos, basadas en experimentos, que relacionan las categorías de estabilidad de Pasquill (o Pasquill-Gifford, Pasquill-Gifford-Turner, etc) con otros parámetros que describen la propagación de un penacho. Este tipo de fórmulas

que discretizan un medio continuo como es la atmósfera, están en desuso a favor de modelos basados en los cálculos de difusión del penacho con parámetros físicos que rigen la turbulencia de la CLA (flujo de calor, cizalladura, altura de la capa de inversión, longitud Monin-Obukhov). La tabla 2 muestra un ejemplo de varios valores observados en diferentes condiciones atmosféricas con penachos de humo.

Tabla 2. Estabilidad PG y desviación estándar de la dirección horizontal del viento

ESTRATIFICACIÓN	DESVIACIÓN ESTANDAR	GRADIENTE DE TEMPERATURA
A	$\sigma_\theta \geq 22.5°$	G ≤-1.9 °C/hm
B	$22.5° > \sigma_\theta \geq 17.5°$	-1.9 °C/hm < G ≤-1.7 °C/hm
C	$17.5° > \sigma_\theta \geq 12.5°$	-1.7 °C/hm < G ≤-1.5 °C/hm
D	$12.5° > \sigma_\theta \geq 7.5°$	-1.5 °C/hm < G ≤ -0.5 °C/hm
E	$7.5° > \sigma_\theta \geq 3.8°$	-0.5 °C/hm < G ≤ 1.5 °C/hm
F	$3.8° > \sigma_\theta \geq 2.1°$	1.5 °C/hm < G ≤4.0 °C/hm
G	$2.1° > \sigma_\theta$	4.0 °C/hm < G

Deposición

Durante el transporte del material radiactivo en el penacho (o cualquier otro tipo de contaminación), éste es eliminado mediante procesos de deposición que tienen lugar, sobre todo, cuando el penacho toca el suelo. También existe eliminación de material radiactivo debido a procesos de sedimentación húmeda (debidos a la lluvia). Además, las partículas de mayor tamaño son depositadas en la superficie debido a la gravedad (las partículas que tengan un diámetro aerodinámico inferior a los 10 μm se comportan como un gas y siguen las corrientes de aire con facilidad).

La deposición seca depende de las características de las partículas, las condiciones climáticas y el tipo de superficie. La deposición seca de pequeñas partículas en superficies ásperas (árboles con hojas) puede realizarse de 10 a 100 veces más rápidamente que su depósito en superficies lisas (tejados, calles, es decir "superficies urbanas").

La trayectoria de una partícula puede ser descrita por una magnitud denominada velocidad de deposición, que se define como la tasa de deposición dividida entre la concentración de partículas próximas a la superficie. Los valores típicos más utilizados para los cálculos son 10^{-2} ms^{-1} para aerosoles y compuestos inorgánicos de iodo y 10^{-4} ms^{-1} para iodo orgánico. No hay deposición de gases nobles (Xe, Kr, etc).

La deposición húmeda puede realizarse por caída con las gotas de agua de lluvia (contaminante dentro de las nubes) o por lavado o arrastre por agua de lluvia (contaminante por debajo de las nubes).

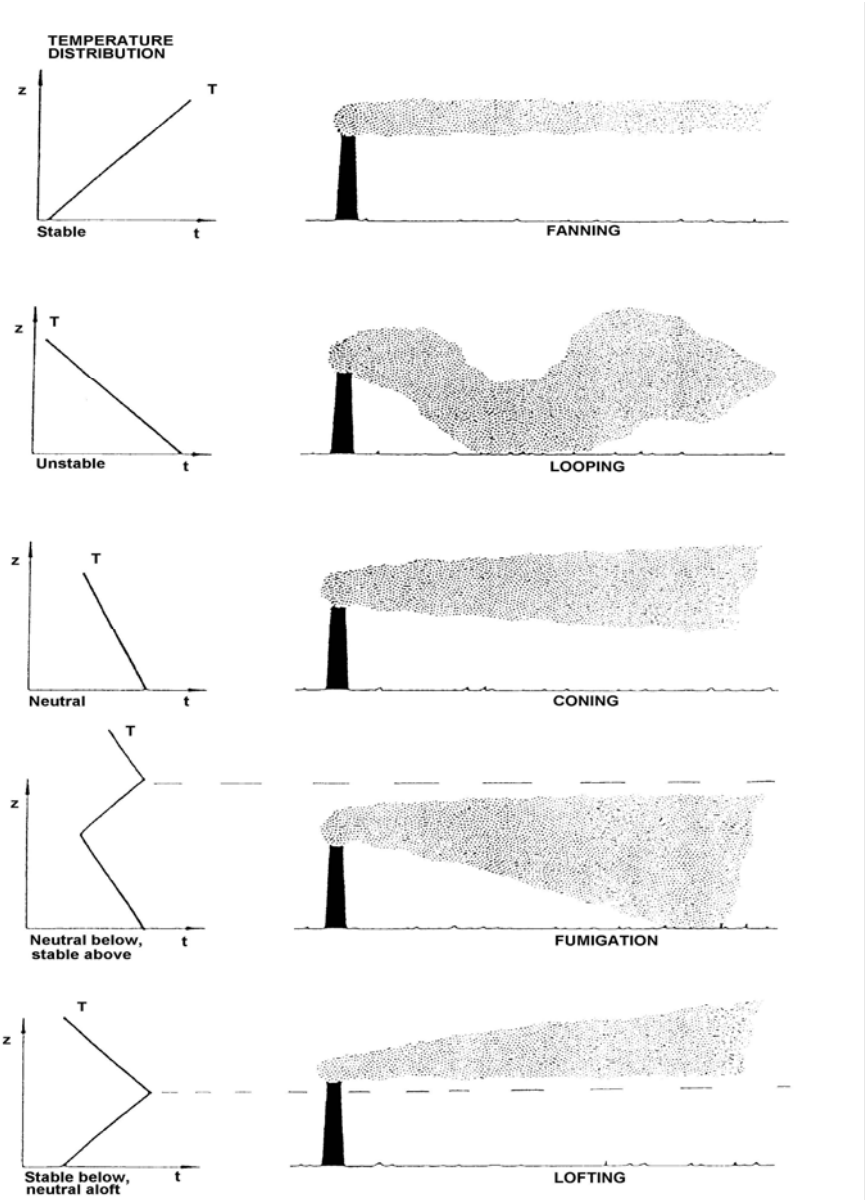

Figura 5. Varios tipos de pautas de penacho dependiendo de los perfiles de temperatura.

En general, las tasas debidas a la caída con las gotas de agua, formadas a partir del contaminante que actúa como núcleo, son más rápidas que las tasas de deposición por lavado con la excepción del caso de partículas mayores de 1 μm de tamaño. En la práctica estos dos procesos generalmente se agrupan ya que pueden modelarse de manera similar. Su efecto combinado es a menudo explicado por el coeficiente de lavado Λ, que depende de las características de las partículas de que se trate y del tipo e intensidad de las precipitaciones. Λ corresponde con la constante de

eliminación de contaminantes de un penacho por deposición húmeda. Los valores típicos son del orden 10^{-5} a 10^{-4} s^{-1}.

Dado que las precipitaciones son capaces de eliminar las sustancias a diferentes alturas en la atmósfera, la deposición puede aumentar en un factor de 10 o en algunas ocasiones incluso por un factor de 100 (en el caso de fuertes lluvias y en un penacho bien mezclado). Las lluvias por lo general tienen un carácter espacialmente heterogéneo. Por consiguiente, la sedimentación puede presentar una gran variación espacial ('puntos calientes').

La deposición debida a precipitaciones de nieve puede ser el doble de eficaz que la debida a la lluvia. También la deposición debida a la niebla, en comparación con la deposición seca, puede ser varias veces superior (incluso 100 veces superior, si la concentración de radionucleidos en el aire es baja).

Sobreelevación del penacho y otros efectos

La elevación inicial, o altura efectiva de un penacho o de un una emisión instantánea (*puff*) depende de las características de la propia emisión y de las condiciones meteorológicas.

El ascenso del penacho tiene lugar principalmente, o bien porque los gases están calientes (combustión) o bien porque estén impulsados verticalmente (ej., una explosión). Otras posibles causas son el autocalentamiento debido a la desintegración de los materiales radiactivos del penacho o por un alto contenido en vapor de agua (calor latente).

En algunas situaciones el penacho puede traspasar la barrera existente entre la capa de mezcla y la atmósfera libre. En ese caso, puede ser transportado a grandes distancias sin que se observe ninguna concentración en superficie. Posteriormente, por cambios en el estado de la atmósfera puede llegar a mezclarse con el aire de niveles inferiores.

El comportamiento de un penacho - altitud y propagación - en las proximidades de la fuente también se ve afectado por la presencia y geometría de las chimeneas y de los edificios cercanos. Cuando la emisión se produce por una chimenea con baja velocidad de salida puede ocurrir que la depresión formada a sotavento de la misma dirija al penacho al suelo e impacte en sus proximidades; con el fin de evitar esto, la velocidad de emisión debería ser (por lo menos) de 1,5 a 2 veces superior a la velocidad del viento.

Puede ocurrir que la emisión se realice directamente a una cavidad o una zona de recirculación de un edificio (edificio del reactor, por ejemplo), lo que provocaría que la difusión inicial del penacho fuese mayor.

Como regla general se puede decir que el efecto de las estructuras cercanas a una fuente de emisión puede despreciarse si la altura del foco emisor es de 2 a 3 veces superior a la de las estructuras.

Modelización de la dispersión

En los modelos Gaussianos de dispersión, la distribución horizontal y vertical de un penacho se supone que se ajusta a una forma Gaussiana (ver figura) caracterizada por los parámetros de dispersión (desviaciones estándar de las concentraciones) que dependen de la estabilidad atmosférica, distancia de la fuente, rugosidad y tiempo de observación (tiempo de muestreo). En los modelos de emisiones instantáneas, un penacho continuo, gaussiano o no, se aproxima descomponiéndolo en una serie de emisiones de corta duración (puffs). Las fórmulas matemáticas y los gráficos de parámetros de dispersión aplicados en el modelo Gausssiano se pueden encontrar en bibliografía.

Los modelos Gaussianos presuponen una trayectoria rectilínea del penacho y que las características del viento y las turbulencias son constantes en el tiempo. Dada esta asunción, son aplicables sólo a cálculos de hasta pocas decenas de kilómetros de distancia desde el foco emisor. Los modelos basados en emisiones instantáneas pueden actualizar las condiciones del viento y las turbulencias durante el transporte pero no permiten variarlas espacialmente de forma continua sino a intervalos de tiempo.

También es posible aplicar el modelo de Gauss por separado a cada uno de los distintos tramos rectilíneos en que se puede aproximar la trayectoria curvilínea de un penacho. Este tipo específico de modelo es un ejemplo de una categoría más general de modelización llamada modelos de trayectoria.

Uno de los principales inconvenientes del modelo Gaussiano es que no tiene en cuenta correctamente los procesos de deposición seca. Por este motivo, habitualmente se supone que la distribución vertical de concentración está afectada sólo por la resuspensión al nivel del suelo (y no a todas las alturas), y por lo tanto no altera la forma de la distribución vertical. Esto se ha mejorado, (al menos en parte) con los llamados modelos Kz (modelos gradiente – transporte) en los cuales la distribución vertical de la concentración se calcula con su correspondiente ecuación de difusión.

Para casos de emisión prolongada es preciso disponer de modelos de dispersión más dinámicos y sofisticados con el fin de poder tener en cuenta los efectos de los cambios producidos en las condiciones meteorológicas. Con los modelos de tipo numérico, se pueden resolver de manera más exacta las variaciones espaciales y temporales de la concentración, los efectos en la mesoescala y los transportes de largo recorrido (resolviendo las ecuaciones generales de advección – difusión). También son útiles los modelos de Lagrange, donde se estudia el movimiento turbulento de un gran número de partículas del penacho.

Estos modelos tienden a ser bastante complejos y, a menudo, suponen la utilización de códigos meteorológicos específicos de predicción, así como una base de datos meteorológica nacional o internacional. Sin embargo, pueden existir situaciones complejas donde incluso los modelos más actualizados pueden no ajustarse a la realidad.

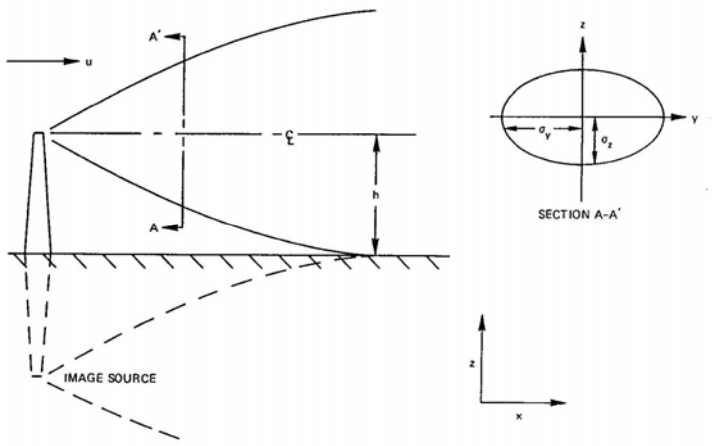

Figura 6 Diagrama dispersión de penacho Gaussiano

Donde:

u = velocidad del viento
h = altura efectiva relativa
σy y σz, son los parámetros de dispersión (las desviaciones estándar de distribuciones de concentración de viento de costado).

El incremento de concentración debida a la reflexión producida en el suelo se tiene en cuenta empleando una imagen simétrica. Podría también emplearse una imagen para tener en cuenta la dispersión debida al choque con la capa de mezcla.

7.1.2. OBSERVACIONES METEOROLÓGICAS DENTRO DEL EMPLAZAMIENTO E INTERCAMBIO DE DATOS

Para la estimación de la dispersión de emisiones radiactivas, es necesario realizar medidas meteorológicas en el emplazamiento tanto en condiciones de funcionamiento normal de la planta como en situaciones de accidente. Es importante tener en cuenta que todos los datos se basan en medidas realizadas en las proximidades de la planta y por lo tanto sólo serán representativos a una cierta distancia, de unas pocas decenas de kilómetros aproximadamente. Para distancias mayores se deberá tener en cuenta los datos de las estaciones de observación de la red meteorológica más cercanas.

Los datos meteorológicos locales deben consistir, al menos, en velocidad y dirección del viento, precipitación y estructura de la capa de mezcla (altura y estabilidad atmosférica).

Los resultados de las medidas meteorológicas en el emplazamiento, así como otras magnitudes relacionadas con la dispersión deben estar disponibles en la sala de control de la planta. Asimismo, estos datos (promediados a intervalos de 15 minutos) son transmitidos electrónicamente en tiempo real al Consejo de Seguridad Nuclear (SALEM).

Las medidas en continuo de parámetros meteorológicos pueden llevarse a cabo con equipos instalados en una torre, un SODAR de efecto Doppler (basado en la variación de la longitud de onda incidente y la reflejada por un objeto en movimiento), una combinación de éstos, o un LIDAR (tecnología similar al SODAR pero con un emisor láser). Un sistema SODAR hace posible observar las condiciones atmosféricas en un nivel mucho más alto que las medidas efectuadas por una torre meteorológica. Sin embargo, con un SODAR, es necesario realizar medidas complementarias cerca de la superficie e incluso intercomparaciones con sondeos realizados con globo cautivo.

La torre y los sensores meteorológicos deben ser colocados de tal manera que las estructuras que los rodean y las características del terreno no interfieran en las medidas. La torre debe ser lo suficientemente alta como para obtener datos representativos del viento y para determinar la estabilidad atmosférica (turbulencia, gradiente de temperatura, etc).

Los parámetros de dispersión utilizados en los cálculos se pueden determinar por medidas directas de turbulencia (por ejemplo con anemómetros sónicos) o, indirectamente, midiendo la variación vertical de la temperatura o la velocidad del viento y sus fluctuaciones de dirección. Las medidas realizadas en el nivel más bajo de la torre deben cumplir los requisitos internacionales para observaciones sinópticas (temperatura, presión, humedad, precipitación).

El sistema SODAR debe instalarse en un lugar que esté suficientemente alejado de los edificios altos y de posibles fuentes de ruido. El SODAR, con un software adecuado, calcula las componentes del viento en la capa de mezcla. Estos datos se emplean para determinar la dirección y velocidad del viento, las fluctuaciones en la dirección del viento, y los parámetros de dispersión y altura de la capa de mezcla.

7.1.3. REDES METEOROLÓGICAS INTERNACIONALES, NACIONALES Y REGIONALES E INTERCAMBIO DE DATOS

La red internacional de estaciones meteorológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) está compuesta por aproximadamente 10000 estaciones terrestres por todo el mundo para la medida de parámetros atmosféricos sinópticos.

Además, el sistema de observación incluye cuatro satélites en órbita polar y otros cinco geoestacionarios, 7.000 estaciones-buque (además de 300 boyas meteorológicas), así como una serie de estaciones de sondeo.

Los datos se envían rutinariamente o se encuentran disponibles a través de los enlaces de telecomunicaciones (GTS, Sistema Mundial de Telecomunicaciones) a tres estaciones Mundiales (Melbourne, Moscú, Washington), 35 regionales (en Europa: Offenbach, Toulouse, Bracknell, Praga, Sofía) y 183 Centros Meteorológicos Nacionales que cooperan unos con otros. Las observaciones sinópticas son recogidas normalmente cada tres horas y, al menos, deben incluir datos sobre temperatura, humedad, viento, presión del aire y lluvia.

En el plano internacional existe cooperación también en relación a los modelos climáticos y bases de datos meteorológicas. El ECMWF (Centro Europeo de Predicción

a Plazo Medio) está localizado en Reading (Gran Bretaña). El modelo HIRLAM (Modelo Área Limitada de Alta Resolución), es un modelo regional (área limitada) de predicción numérica del tiempo que se encuentra operativo en el INM (Instituto Nacional de Meteorología) desde el mes de febrero de 1995.

Es el resultado de un proyecto de cooperación entre varios países europeos (Finlandia, Suecia, Noruega, Dinamarca, Holanda, Irlanda, Islandia y España, más Francia como colaborador), para desarrollar modelos de predicción numérica del tiempo a corto plazo. La cooperación se realiza en el campo de I + D, mientras que cada país tiene su propia cadena operativa. Sin embargo, hay un modelo de referencia que es mantenido y actualizado regularmente.

7.1.4. ACUERDOS INTERNACIONALES PARA CÁLCULOS DE DISPERSIÓN EN CASO DE ACCIDENTES NUCLEARES

Muchas organizaciones internacionales (la OMM, la OIEA, la UE, la OTAN) o bien tienen sistemas para realizar cálculos de dispersión por sí mismos o pueden actuar como centros de distribución y enviar los resultados calculados por otros países miembros. Además, algunos países tienen acuerdos bilaterales para el intercambio de resultados de los cálculos. Ya existen acuerdos, como la Convención de OIEA sobre la Ayuda en el Caso de un Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica, donde animan a firmar disposiciones bilaterales o multilaterales para la ayuda general.

Los acuerdos internacionales necesarios para que un país pueda llevar a cabo sus actividades de emergencia de forma adecuada dependerán principalmente de la propia infraestructura del país (en relación con el acceso a las observaciones meteorológicas y bases de datos), así como de la calidad de los sistemas de cálculo de dispersión utilizados. A este respecto, la situación puede variar de un país a otro. Cabe suponer, sin embargo, que prácticamente todos los países europeos, o bien ya tienen o bien pueden adquirir un sistema independiente para la realización de cálculos de dispersión.

El apoyo prestado por las organizaciones internacionales y los acuerdos firmados deberían concentrarse en cálculos de dispersión en la mesoescala y en la macroescala.

7.1.5. INFLUENCIA DE LOS FACTORES ESTACIONALES Y DE LA TOPOGRAFÍA

La influencia de la topografía en la dispersión atmosférica puede ser de gran importancia. Podemos poner como ejemplo la compleja topografía de las zonas costeras, así como la de valles y colinas, que dan lugar a cambios en las condiciones de viento (brisa mar / tierra, vientos de montaña / valle, canalización del viento en un valle, etc.). Aunque estos cambios son periódicos (a menudo diurnos), pueden evolucionar muy rápidamente.

Además, cuando las corrientes de aire cruzan una línea costera se forma una capa límite interna debido al calor y a las diferentes características de la superficie de la tierra y el agua. En las centrales nucleares situadas en lugares cercanos a una gran masa de agua (mar, grandes lagos) puede ocurrir (cuando actúa la brisa de mar) que

nos encontremos en un situación en la que los resultados de las medidas de la parte superior de una torre reflejen las condiciones del mar mientras que los resultados de las medidas de un nivel inferior representen las condiciones de la tierra. Esto puede complicar, además, la estimación de la estabilidad atmosférica si ésta se basa en medidas de temperatura a diferentes alturas.

En ocasiones el material radiactivo puede ser emitido desde la chimenea a una altura efectiva que presente condiciones estables semejantes a las del mar. Cuando el penacho, al trasladarse, se encuentre con el borde interior de la capa límite, es posible que se mezcle de repente con el aire inestable de capas inferiores (fumigación, véase la figura 5).

En general, los efectos de topografías complejas en la dispersión no pueden ser fácilmente tenidos en cuenta por los modelos sencillos (por ejemplo modelos Gaussianos). En lugar de ello, puede requerirse el uso de modelos numéricos o modelos de partículas.

Variaciones estacionales

Muchos de los parámetros importantes para estimar la dispersión atmosférica presentan una variabilidad estacional: la frecuencia y la intensidad de la lluvia a menudo depende de la temporada, así como la dirección predominante del viento, y las nevadas durante el invierno, etc.

Aunque las condiciones meteorológicas predominantes puedan ser tenidas en cuenta en modelos de dispersión modernos, es preferible el uso de una base de datos simple, fácil de usar, que contenga los valores de los parámetros clave a lo largo de las distintas estaciones (o meses del año). Esta información podría ser utilizada en los casos en que los resultados de meteorológicos en tiempo real no estén disponibles.

7.1.6. LIMITACIONES E INCERTIDUMBRES

Los modelos de dispersión presentan limitaciones debidas a los supuestos básicos realizados y a los algoritmos utilizados. Los modelos Gaussianos simples son normalmente sólo aplicables a una distancia máxima de unas pocas decenas de kilómetros, dado que a mayor distancia no es razonable considerar los datos constantes.

Existen también limitaciones en otros modelos, motivados, por ejemplo, por las necesidades de cálculo de los ordenadores (modelos numéricos) o del número finito de partículas seguidas (modelos de partículas).

Los datos meteorológicos medidos que se introducen en los modelos pueden ser inexactos, pueden reflejar sólo condiciones meteorológicas momentáneas o ser demasiado escasos para caracterizar las condiciones en el ámbito deseado. Además, la interfaz utilizada puede ser demasiado compleja y dificultar excesivamente su uso.

La tabla 3 muestra un listado de los factores de incertidumbre más importantes del modelo Gaussiano de dispersión utilizado en casos de emergencia. Los factores mencionados son generalmente, pero no siempre, multiplicativos.

Tabla 3 Posibles factores que dan lugar a la incertidumbre en la dispersión en cálculos realizados con un modelo Gaussiano constante.

Origen de la incertidumbre	Factor de incertidumbre
Estelas de edificios(distancia < 2 km)	100 - 1000
Altura efectiva	2 - 10
Cambios (Movimientos) de campo de viento (distancia > 1 km)	100 - 1000
Velocidad del viento	4 - 10
Turbulencia atmosférica	2 - 10
Agotamiento material (deposición)	2 - 10

7.1.7. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material.
2. Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio, por el que se aprueba el Plan Básico de Emergencia Nuclear.
3. Guía de Seguridad NS-G-3.2 de la OIEA: Dispersión del material radioactivo en aire y agua y consideración de la distribución de la población en Emplazamientos Nucleares. 2002 *(que sustituye a la Guía de Seguridad 50-SG-S3 de la OIEA: Dispersión Atmosférica en Emplazamientos Nucleares. 1980)*.

7.2 EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Objetivos

El tema ofrece una visión general de las consecuencias de los accidentes en la contaminación del aire, aguas superficiales, suelo y alimentos. Se examina la previsión de la evolución de las situaciones de emergencia utilizando los modelos de dispersión atmosférica y de cálculo de dosis. Se describen los criterios para la utilización de las medidas de tasa de dosis suministradas por las redes de vigilancia radiológica ambiental, la medida de la tasa de dosis producidas por el material depositado y el análisis de contaminación radiactiva de muestras ambientales. Se destacan las grandes incertidumbres que afectan a los modelos de predicción.

También se examinan las consecuencias de un accidente a corto y largo plazo, económicas y sociales, así como los efectos sobre el personal desplazado, los usos de la tierra, la producción agrícola, la industria alimentaria, etc.

Contenidos

- Revisión de la evaluación del accidente.
- Requisitos necesarios para la evaluación de la contaminación ambiental.
- Intercambio automático de datos entre las redes de vigilancia regionales.
- Evaluación de la contaminación en aire, superficies y alimentos.
- Requisitos de la evaluación de consecuencias
- Garantía de calidad en la evaluación de las consecuencias
- Efectos a corto y largo plazo en personal desplazado, usos del suelo, producción agrícola, industria de procesamiento de alimentos, etc.

7.2.1. REVISIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL ACCIDENTE

En las primeras etapas de un accidente nuclear, la estimación de las posibles consecuencias ambientales y sobre la salud debe basarse en las condiciones en que se encuentre la central nuclear, es decir, en el estado de la planta, de sus sistemas de seguridad y en la evolución prevista del accidente. En algunos casos, esta información puede ser incierta o incoherente y, por tanto, el uso que se puede hacer de ella es limitado. Por lo tanto, tan pronto como estén disponibles los resultados de la vigilancia radiológica ambiental, se evaluará su importancia y se tendrán en cuenta para determinar mejor las consecuencias.
No obstante, en determinadas secuencias accidentales de evolución muy rápida, y en las que es previsible la emisión de grandes cantidades de material radiactivo al medioambiente, puede ser necesario aplicar medidas de protección urgentes antes de disponer de una evaluación detallada de las consecuencias radiológicas que pudieran derivarse.

7.2.2. REQUISITOS NECESARIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Para la organización exterior de la respuesta en emergencia, tanto en una situación de riesgo real de emisión de material radiactivo, como si ésta ya se hubiera producido, es importante disponer de un rápido acceso a los datos meteorológicos.

La situación meteorológica general y los parámetros meteorológicos necesarios para los cálculos son obtenidos de las medidas facilitadas por las estaciones de la red nacional. Los datos meteorológicos locales son necesarios pero no suficientes para la evaluación de las consecuencias producidas por las emisiones provenientes de un accidente grave fuera del emplazamiento.

Una torre meteorológica local proporciona datos a diferentes alturas. Sin embargo, como ya se ha explicado anteriormente, estos parámetros meteorológicos locales pueden no ser representativos de un área mayor, por ejemplo, si la central se encuentra en las proximidades de la costa, donde los efectos mesometeorológicos son determinantes.

En una situación previa a la emisión es importante ser capaz de confirmar exactamente el momento en el que comience la emisión al exterior. Por esta razón es necesaria la vigilancia radiológica ambiental incluso en la dirección contraria (sotavento) del viento. También se puede obtener información valiosa sobre la tasa de dosis ambiental utilizando un avión o helicóptero.

Durante y después de la emisión, los datos fundamentales que han de conocerse son la tasa de dosis ambiental y la concentración de partículas radiactivas en el ambiente afectado por el penacho. El seguimiento de los resultados que se obtengan con las medidas confirmará o servirá para corregir la trayectoria del penacho que se hubiera estimado. Esta información también indicará si se superan los niveles de intervención o es probable que esto ocurra y proporcionará ayuda para cuantificar los riesgos.

7.2.3. INTERCAMBIO AUTOMÁTICO DE DATOS ENTRE LAS REDES REGIONALES DE VIGILANCIA

Redes de estaciones fijas de medida

Con el fin de detectar rápidamente la contaminación ambiental en una situación de emergencia, se necesita disponer de una red fija de estaciones de medida en las proximidades de la central nuclear, además de equipos de medida portátiles. Los instrumentos utilizados deberán ser fiables y fáciles de leer y utilizar. Los requisitos de sensibilidad no son críticos, ya que, en la primera fase de un accidente, generalmente cualquier situación de cierta importancia generará valores de tasa de dosis muy superiores a los niveles de fondo.

Los equipos de medida de tasa de dosis que formen parte de la red fija de estaciones pueden ser tubos GM (Geiger Müller), contadores proporcionales o cámaras de ionización.

El umbral de alarma de estas redes debe establecerse lo más bajo posible, pero evitando que se produzca un número excesivo de falsas alarmas. La experiencia con equipos de detección modernos demuestra que un nivel óptimo de alarma de tasa de dosis se puede fijar en el doble del fondo radiactivo natural del lugar, muy por debajo de los niveles en que podría considerarse la implantación de restricciones de actividades al aire libre.

En el módulo se explican con más detenimiento las redes existentes en España para la medida de tasa de dosis ambiental.

Existen además una red de monitores de vigilancia de la radiación tanto en los puntos de emisión como en áreas vitales dentro de la instalación que permiten cuantificar la cantidad de material que puede ser emitida al exterior.

Equipos de personal para medidas radiológicas

Antes de que se produzca la emisión de material radiactivo al exterior, el titular de la central nuclear activará el Plan de Vigilancia Radiológica en Emergencia (PVRE), lo cual estará contemplado en el Plan de Emergencia Interior (PEI). En caso de emergencia las estaciones de muestreo del PVRA (Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental) servirán como puntos de muestreo representativos, para lo cual se recogerán las muestras necesarias y se analizarán con toda la rapidez que sea posible en el laboratorio acreditado contratado para el servicio en caso de emergencia.

Además pueden obtenerse medidas in-situ mediante unidades móviles, las cuales contienen tanto dispositivos de muestreo (sondas, muestreadores de aire, etc) como de análisis (espectrómetros, detectores de germanio, etc).

El personal del Grupo Radiológico, dado que posee conocimientos suficientes y tiene a su disposición los equipos portátiles de medida de radiación y contaminación, puede realizar medidas de vigilancia radiológica si así lo dispone el Jefe del Grupo Radiológico.

Por supuesto, como hemos comentado en módulos anteriores, para el seguimiento de la contaminación ambiental es muy valiosa la información que puedan proporcionar las redes de medida de estaciones fijas (RAR, REA, redes de CCAA, etc).

Por último, siempre pueden colaborar en tareas de vigilancia radiológica las unidades especializadas de los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado: Unidad Militar de Emergencias, División NRBQ de la Guardia Civil, etc, dado que disponen de la formación y el material necesario para llevar a cabo esta tarea. Su participación en la emergencia estará dirigida por el Director de la Emergencia, en la Delegación o Subdelegación del Gobierno de la provincia afectada.

7.2.4. EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN AIRE, SUPERCICIES Y ALIMENTOS.

Radiactividad en aire

Tanto en el plan de emergencia interior como en el exterior, además de las medidas de tasa de dosis ambiental, se necesita información sobre la naturaleza y características radiológicas de la emisión causante de la contaminación ambiental. Los contadores de alto volumen recogen las partículas radiactivas y los gases presentes en el aire en filtros y/o cartuchos de carbón activo y así pueden detectar un aumento de la radiactividad con mucha más sensibilidad que los detectores de tasa de dosis que forman las redes fijas de vigilancia.

Los filtros y los cartuchos se pueden medir mediante espectrometría gamma y así determinar la composición de los aerosoles muestreados. Una de las necesidades más urgentes es conocer si hay radioiodos presentes en el ambiente y, en caso afirmativo, su concentración.

En los países en los que hay centrales nucleares, durante su operación normal, la Autoridad Reguladora, por lo general, requerirá la instalación de estaciones fijas de muestreo de aire como parte del programa de vigilancia radiológica ambiental. En España, el CSN, en su Guía relativa al Diseño y desarrollo de Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental para centrales nucleares indica las necesidades relativas a este punto:

- Una muestra en cada uno de los dos puntos con la máxima concentración prevista a nivel del suelo situados en el límite o fuera de la zona de acceso restringido al público.
- Una muestra en cada una de las dos poblaciones cercanas con la máxima concentración prevista en el suelo.
- Una muestra de control de una localización situada a una distancia entre 15 y 30 Km. donde la concentración prevista a nivel del suelo sea mínima.

El muestreo de partículas y radioiodos se efectúa de manera continua a lo largo de todos los días del año, y se analizan los filtros semanalmente.

La sensibilidad para la detección de diversos radionucleidos está condicionada por la acumulación de los nucleidos descendientes del radón natural en los filtros. En caso de accidente, los filtros se pueden y deben cambiar a intervalos más cortos de tiempo (a las pocas horas o incluso a intervalos menores). Después deben enviarse a un laboratorio ambiental fuera del emplazamiento para su análisis.

Con el fin de generar rápidamente una alarma cuando el penacho llegue a la ubicación de un muestreador es necesario que éste tenga acoplado un detector de tasa de dosis que, si está blindado de la radiación exterior, detectará rápidamente el aumento de actividad en el filtro como consecuencia de la contaminación ambiental acumulada en él.

Unidades móviles

En las unidades móviles también es necesario disponer de muestreadores de aire. Los equipos de muestreo pueden trabajar con baterías eléctricas o neumáticamente utilizando botellas de aire comprimido. En las unidades móviles debe de haber detectores de tasa de dosis ambiental, y es recomendable que, además, haya equipos que puedan realizar análisis mediante espectrometría gamma.

Sin embargo, en una situación real de contaminación, las necesidades de análisis serán muy grandes, y deberá enviarse muestras a laboratorios ambientales fijos para su análisis.

Como ya hemos visto en el apartado anterior, en España se dispone de varias unidades móviles que en caso de emergencia colaborarían en las tareas de vigilancia radiológica ambiental.

Por un lado el CSN y la Junta de Extremadura tienen un acuerdo respecto al uso de la red extremeña de vigilancia radiológica ambiental. En esa red se tiene a disposición una estación móvil integrada por una furgoneta equipada con un espectrómetro gamma, dotado de un detector de germanio portátil, con un monitor de tasa de dosis, dotado de un contador proporcional de alto volumen y con una bomba de aspiración de alto flujo. Ésta a su vez posee sistemas autónomos de suministros de corriente, de posicionamiento GPS y de transmisión de la información mediante telefonía GSM.

El CIEMAT tiene firmado un acuerdo con el CSN relativo a la Unidad Móvil Ambiental (UMA) para realizar medidas de radiación "in situ" y determinaciones radiométricas de muestras sólidas, líquidas o gaseosas en las posibles zonas afectadas por una emergencia nuclear o radiológica.

El sistema de transmisión de datos desde la UMA debe ser capaz de transmitir a la Salem del CSN los datos de hora, posición y medidas de al menos tasa de dosis, y contaminación del aire (dentro de sus tiempos de integración), en un formato de texto simple. Se dispone para ello se dispondrá de un sistema de transmisión de telefonía móvil, complementado con un sistema de transmisión por satélite. La instrumentación está instalada en un vehículo todoterreno que dispone de un sistema de posicionamiento global (GPS) conectado a un ordenador central que sirve para controlar todos los parámetros de muestreo de los equipos instalados.

El sistema GPS-GSM integrado permite la localización continua de la posición espacial del vehiculo, y tener la información de los parámetros radiológicos georreferenciada.

Los equipos instalados en la UMA son los siguientes:

- Equipo LAM-3040: interface de control de todo el sistema. Incorpora un GPS que da información precisa de día, hora, longitud, latitud, altura sobre el nivel del mar y velocidad del vehiculo. El equipo está gestionado con un Software que permite la seleccionar los parámetros del muestreo.
- Detector de NaI(Tl): sistema de medida y registro en continuo de tasa de dosis gamma en el rango de 0,03 µSv/h a 1,5 mSv/h y que se encuentra situado a 1,5 – 4,5 m del suelo.

- Cámara de ionización esférica de alta precisión: para la medida y registro de niveles bajos de tasa de dosis en continuo, con un rango de medida de 0,01 µSv/h a 1 mSv/h.
- Medidor en continuo de la actividad de partículas y radioyodos en aire (Bq/m3): constituido por un detector de plástico de centelleo para la medida de emisores beta y de un detector de NaI(Tl) para emisores gamma. La muestra se toma con una bomba de aspiración de 3 m3/h, que hace circular el aire por un filtro de fibra de vidrio (retiene las partículas) seguido de otro filtro de carbón activo (para los radioyodos).
- Sistema multicanal con detector de NaI(Tl): para la medida directa de contaminantes en el suelo. Tiene una resolución de 4096 canales y conexión a PC para el análisis de los espectros.

Deposición radiactiva y contaminación superficial

En caso de llover durante la fase inicial de un accidente, el análisis de las muestras de agua de lluvia proporcionarán un método rápido y sensible para conocer la composición del penacho.

En muchos países, entre ellos España, dentro del programa de vigilancia radiológica ambiental se incluye el muestreo de deposición (húmeda: agua de lluvia; seca: suelos) en estaciones de muestreo fijas en el entorno de las centrales nucleares. Conocida la superficie en la que se recoge una determinada cantidad de muestra, es posible determinar la actividad de los nucleidos por unidad de superficie (Bq/m^2). Teniendo en cuenta que las muestras representan el periodo completo de muestreo, los resultados obtenidos se utilizan para el cálculo de la dosis debida a exposición externa y a la contaminación de las cadenas alimentarias locales. Las medidas de deposición radiactiva generalmente están menos influidas por parámetros específicos que las medidas de concentración de radionucleidos en aire.

El muestreo y análisis del suelo, vegetación y aguas superficiales están incluidos en el programa de vigilancia radiológica ambiental durante el funcionamiento normal de las centrales nucleares. Estas medidas pueden dar información valiosa en la fase intermedia de un accidente, cuando tienen que tomarse las decisiones sobre el control de los alimentos o de los suministros de agua.

Radiactividad en alimentos

Cuando existan indicios de contaminación de la cadena alimentaria, es necesario organizar y regular la vigilancia de la distribución de dichos productos.

Se necesita diseñar un buen programa de muestreo y análisis, especialmente en la época de pastoreo, cuando las vacas lecheras y el ganado destinado a producción de carne se alimentan de hierba fresca.

Es fundamental realizar la vigilancia de las concentraciones de actividad de radioiodos en leche y verduras. Asimismo, tras un accidente, los nucleidos de cesio (Cs-134, Cs-137) y de estroncio (Sr-89, Sr-90) deben estudiarse de forma especial durante la primera cosecha, debiendo controlarse la mayoría de los productos agrícolas.

7.2.5. REQUISITOS DE LA EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS

Sistemas de apoyo a la toma de decisiones en tiempo real

Se han desarrollado y están siendo desarrollados por diversas instituciones internacionales y nacionales diversos sistemas de apoyo a la toma de decisiones en tiempo real para la evaluación de consecuencias de accidentes. Se pueden distinguir dos tipos principales de sistemas:

- Sistemas para la toma de decisiones **locales**, que abarcan el área cercana al lugar del accidente, donde las medidas de emergencia serán implantadas rápidamente. Estos sistemas deben tener acceso a la red local de vigilancia radiológica ambiental. Son útiles en las primeras etapas de la respuesta, principalmente en la fase previa a la emisión y durante la propia emisión a la atmósfera.

- Sistemas que abarcan todo un **país**, generalmente evaluando de forma automática los datos de la red nacional de vigilancia de tasa de dosis gamma y la medida de diversos dispositivos de medida más sofisticados instalados en equipos móviles de medida. Estos sistemas son diseñados para la comunicación interactiva. Muchos sistemas incluyen incluso la posibilidad de considerar el efecto de las medidas de protección. Estos sistemas también debe estar vinculados a un sistema de predicción meteorológica de mesoescala, para ser capaces de estimar concentraciones de actividad y dosis de radiación.

Modelos de cálculo de dosis

Los modelos de dispersión meteorológica, como los modelos de penacho o los modelos de partículas combinados con modelos de cálculo de dosis, permiten obtener curvas de concentración de actividad y de dosis por unidad de actividad emitida.

Con modelos sofisticados, los resultados pueden ser presentados de forma separada para dosis debida al paso de la nube, dosis debida a la actividad depositada y dosis por inhalación y también para cada radionucleido o para grupos de radionucleidos con comportamiento similar.

Para el cálculo de dosis de una emisión, se necesita conocer el "término fuente" como tasa de dosis o dosis total liberada al ambiente. Los modelos de cálculo de dosis deben ser modulares, de forma que se puedan utilizar los resultados intermedios para mejorar la precisión de las estimaciones de dosis y sus proyecciones.

Los modelos de cadena alimentaria son usados en accidentes para calcular la dosis a la población debida a la ingestión de alimentos contaminados. En general, éstos modelos deben ser flexibles, para dar resultados dependientes del tiempo y para permitir simular diferentes épocas del año.

Retroalimentación de datos en modelos de predicción de consecuencias

Durante y después de la emisión, a medida que transcurre el tiempo, comenzarán a estar disponibles más datos y mejores relativos al seguimiento de las medidas ambientales. Éstos ofrecen la oportunidad de mejorar, en consecuencia, el cálculo de las predicciones. Las medidas reales de concentración de actividad de radionucleidos en superficie (Bq/m^2) podrán utilizarse como datos de entrada en los modelos de la cadena alimentaria, en lugar de los valores iniciales obtenidos con gracias a los modelos de dispersión y deposición atmosférica. ´

Las concentraciones de actividad de radionucleidos (Bq/kg) en varios tipos de muestras ambientales puede utilizarse de la misma manera. Por ejemplo, si las concentraciones de actividad en hierba fresca (alimento de las vacas lecheras) fueran conocidas, se podría mejorar considerablemente la precisión de las predicciones relativas a la transferencia de radionucleidos a través de la cadena alimentaria de la leche.

Las predicciones iniciales de tasa de dosis y concentración de radioisótopos de iodo, cesio y estroncio actualizadas con valores reales de contaminación superficial real son importantes para planificar adecuadamente la intervención sobre los alimentos de la zona. Los modelos deben ser lo suficientemente flexibles como para permitir asimilar el creciente número de datos de medida que se vayan acumulando durante las distintas fases de la deposición radiactiva. En algunas situaciones concretas, las medidas in-situ pueden sustituir a las predicciones basadas en modelos, pero, no obstante, éstos son importantes para la gestión general de cualquier situación de consecuencias a gran escala.

Las medidas protectoras y las restricciones deben aplicarse con precaución pero de forma generalizada durante la primera fase de una emergencia. Los datos que se vayan obteniendo de las medidas probablemente permitirán la retirada gradual de algunas restricciones. Este enfoque es psicológicamente mejor, dado que permite reducir gradualmente la amplitud de la zona geográfica o el tipo de actividades y productos a los que se aplican las restricciones.

7.2.6. GARANTÍA DE CALIDAD EN LA EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS

Limitaciones e incertidumbres

En la fase previa a la emisión, los cálculos de las dosis podrán hacerse utilizando hipótesis conservadoras cuando no se disponga de información adicional. Los modelos de dispersión meteorológica pueden proporcionar resultados acerca de las posibles zonas afectadas, pero estas predicciones también presentan sus limitaciones. En particular, recordemos la dificultad de estimar la altura efectiva del penacho y la gran variación que puede presentar la dirección del viento con la altura.

Si la documentación de un modelo no es suficiente, siempre habrá dudas sobre la fiabilidad y la utilidad de las predicciones. Los modelos deben indicar también la incertidumbre de los mismos a la hora de interpretar sus resultados. En el momento en el que se conozcan los datos reales, por ejemplo, las características fisicoquímicas del

material radiactivo depositado, debe realizarse su comparación con los datos supuestos iniciales utilizados en el modelo.

Cuestiones importantes a considerar son la cuantificación de las incertidumbres de los diversos resultados de las predicciones e identificación de los factores que más contribuyen a dicha incertidumbre. Si no se obtienen resultados de medidas ambientales la incertidumbre, en el mejor de los casos, puede llegar a ser inferior a un factor de 2 con un modelo local bueno, pero superior a 10 si el modelo no es específico del lugar.

Si se dispone de información sobre radiación ambiental tal como mapas radiológicos de tasa de dosis y resultados de espectrometría gamma de algunas muestras ambientales representativas, la incertidumbre de las dosis estimadas al público es posible que pueda reducirse hasta el 30%. Esta estimación no tiene en cuenta los efectos de los cambios en el estilo de vida que puede producir el accidente.

Los parámetros de deposición húmeda y seca son probablemente la causa de la mayor parte de incertidumbre en la primera fase de una emergencia. Los parámetros de transferencia de los radionucleidos depositados en el terreno a la hierba y alimentos de origen vegetal son también difíciles de calcular, pero tienen menos influencia en el resultado final.

Consistencia de los resultados

Los laboratorios que participan en la vigilancia radiológica ambiental deben llevar a cabo una adecuada gestión del aseguramiento de la calidad, lo que facilita la comunicación y fiabilidad de los datos obtenidos. Debe de tenerse la certeza de que los resultados de laboratorios diferentes son comparables entre sí.

En una situación de emergencia, al igual que en operación normal, los datos de la vigilancia radiológica ambiental deben ir acompañados de su grado de incertidumbre, con el fin de que se pueda determinar el tipo de uso que puede hacerse de los datos. Para loas análisis de suelos y vegetación, debe incluso indicarse, el método de toma de muestra y su representatividad.

La garantía de calidad en la vigilancia radiológica ambiental requiere principalmente tres cosas:

- **Verificación**. El resultado de una medida real o del cálculo de un modelo no puede comunicarse sin antes ser comprobado y verificado por una persona con conocimientos y responsabilidad suficientes.

- **Calibración**. Los equipos de medida y los métodos de análisis deberán ser calibrados periódicamente, debiendo disponerse de los correspondientes certificados de calibración.

- **Intercomparaciones**. A pesar de la verificación y calibración, seguirán existiendo diferencias estocásticas y sistemáticas con respecto a los resultados de otros laboratorios. Los errores sistemáticos los chequearán mediante la realización de

intercomparaciones de laboratorios, en los que dos o más de ellos medirán las medidas muestras o partes alícuotas de ellas.

Hay que tener cuidado para evitar la contaminación de las instalaciones y de los equipos de medida. Deben observarse buenas prácticas en el laboratorio y deben registrarse los valores de fondo sistemática y cuidadosa. Para aumentar la credibilidad de los resultados puede facilitarse incluso información de cómo se evita la contaminación del laboratorio en situaciones de elevada radiactividad en el aire a nivel del suelo.

7.2.7. EFECTOS A CORTO Y LARGO PLAZO EN PERSONAL DESPLAZADO, USO DEL SUELO, PRODUCCIÓN AGRÍCOLA, INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS, ETC.

Estos efectos indirectos también requieren la adopción de medidas desde el CSN y Protección Civil. Un accidente nuclear o una emergencia radiológica puede tener efectos indirectos que no se pueden medir como efectos sobre la salud. Estas consecuencias indirectas dependen en gran medida de las circunstancias locales y las variaciones estacionales, que, pueden eliminar algunas de ellas o introducir nuevos problemas específicos. Con el fin de ser eficientes, deben considerarse estas consecuencias desde el inicio de la toma de decisiones.

Efectos en personal desplazado

Después de producirse un accidente existirá una preocupación internacional lógica relativa a la seguridad de los ciudadanos de otros países que viajen como turistas o por motivos profesionales a la zona afectada. Las autoridades de los países vecinos se verán presionadas para disponer de transporte especial para una posible repatriación de sus ciudadanos. El país donde se produzca el accidente también tendrá que tener en cuenta los problemas con la transmisión de la información que pueden encontrar los extranjeros, motivados por el cambio de idiomas.

Efectos en los usos del suelo

Puede darse el caso de que en algunas áreas la dosis residual sea lo suficientemente alta para ordenar la evacuación permanente. Desde el punto de vista económico, los gastos de traslado temporal serán superiores a los costes de reubicación permanente para períodos de entre uno y cinco años. También puede ser que la contaminación residual prive a la población local de ingresos, por ejemplo, si el suelo agrícola está demasiado contaminado como para continuar con el cultivo.

Efectos en la producción agrícola

Algunas medidas para proteger la producción agrícola deben llevarse a cabo rápidamente para que sean eficaces. Es importante cerrar los sistemas de ventilación de los invernaderos para evitar su contaminación radiactiva y la restricción del uso de los pastos después de la deposición de radioiodos o cesios. También debe organizarse sin demora el seguimiento del iodo en la alimentación del ganado alimentado con

pasto fresco. En la leche los radioiodos aparecerán significativamente un día después, aproximadamente, de producirse la deposición inicial del material radiactivo.

Efectos en industria de procesamiento de alimentos

Los niveles de intervención del *Codex Alimentarius* especifican los niveles de nucleidos aceptables en el comercio internacional. Al igual que la OIEA y la guía EC, especifica en algunos casos niveles menores para la comida infantil que para el resto de la población. Una vez que la vigilancia radiológica de los productos agrícolas está en marcha, las industrias lácteas pueden elegir las materias primas con baja concentración para la preparación de los alimentos infantiles; por ejemplo la leche de las explotaciones menos contaminadas pueden ser seleccionadas para la preparación de los productos sustitutivos de la leche materna.

Efectos en otros tipos de industrias de procesamiento

Un accidente nuclear grave atrae la atención internacional y, por tanto, afectan a las importaciones y las exportaciones. Entonces se necesita implementar un sistema específico para ello.

7.2.8. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material.
2. Guía de Seguridad Nº 55 de la OIEA. Planificación de respuesta exterior ante accidentes en instalaciones nucleares. 1981.
3. Guía de Seguridad nº 86 de la OIEA. Técnicas y Toma de Decisiones en el asesoramiento de las consecuencias fuera del emplazamiento den caso de accidente en una instalación nuclear. 1987.
4. Guía de Seguridad GSG-04.01del CSN. Diseño y desarrollo de Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental para centrales nucleares. 1993

7.3 ANALISIS DE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN DEL PÚBLICO A LA RADIACIÓN

Objetivos

Conocer las principales vías de exposición a la radiación en una situación de emergencia en la que exista contaminación radiactiva, para poder detectar las vías críticas y los subgrupos de población de mayor riesgo en las distintas etapas posteriores a la emisión del material radiactivo, una vez que se tenga información relativa a la exposición y a la contaminación de la zona afectada.

Contenidos

- Composición de radionucleidos emitidos.
- Importancia relativa de las vías de exposición.
- Inhalación.
- Ingestión.
- Exposición externa.
- La información al público sobre las vías de exposición.

7.3.1. COMPOSICIÓN DE RADIONUCLEIDOS EMITIDOS

La composición de las emisiones radiactivas procedentes de reactores nucleares varían dependiendo del tipo de accidente, pero se puede esperar una proporción más o menos constante entre emisores beta y gamma. Los gases nobles se liberan fácilmente en la mayoría de los casos, al inicio de la emisión.

El grado de quemado del combustible influye en la composición en radionucleidos de la emisión. En un accidente grave, la emisión puede durar mucho y los radionucleidos pueden emitirse desde distintas partes del núcleo a medida que pase el tiempo, por lo que habrá cambios importantes en la proporción de radionucleidos.

Una vez comenzada la emisión, pueden detectarse docenas de radionucleidos en la zona afectada. Los radionucleidos emisores gamma contribuyen a la dosis a través de todas las vías. Los emisores alfa o beta puros son productoras de dosis internas, y los emisores beta también pueden irradiar la piel. Algunos radionucleidos se acumulan en órganos específicos tras la ingestión o inhalación. La radiación externa no daña órganos específicos, y como medida de protección es suficiente no superar los límites establecidos para dosis a cuerpo entero.

En caso de un accidente grave, pueden emitirse al exterior grandes cantidades de radioiodos que pueden causar altas dosis en la glándula tiroides vía inhalación. En las proximidades del emplazamiento las dosis pueden llegar a ser lo suficientemente altas como para causar deficiencias tiroideas. El riesgo de cáncer de tiroides,

especialmente en niños que hayan estado expuestos, puede aumentar en un área muy amplia e incluso lejana del lugar del accidente.

Un caso especial sería la contaminación de una zona agrícola con estroncio radiactivo. Después de la ingestión de alimentos contaminados, la medula ósea y otros tejidos óseos, serían los órganos con mayor riesgo (el estroncio tiene un comportamiento químico similar al calcio), aunque no es probable que se alcance una dosis significativa en el público.

7.3.2. IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN

Los miembros de público serán expuestos a la deposición radiactiva tanto por fuentes externas de radiación, como por radionucleidos incorporados por inhalación e ingestión. El tiempo que hayan estado al aire libre influirá tanto en la dosis debida a radiación externa como en la dosis debida a la contaminación interna. Los hábitos de consumo dividen a la gente en subgrupos, receptores cada uno de ellos de diferentes dosis por ingestión.

Las vías de exposición a la radiación de cada individuo están influidas por las característica medio ambientales y demográficas del área afectada, así como por los tipos de viviendas y la estructura industrial de la zona. La importancia relativa de cada vía va variando con el paso del tiempo debido a la desintegración radiactiva, a los procesos ambientales y al comportamiento humano.

Por inhalación, la contaminación radiactiva se incorpora en pocos días, durante y después de la emisión. La mayor parte se recibirá como máximo en uno o dos días. La climatología influye en la eliminación de los aerosoles y gases radiactivos del aire. La ingestión de alimentos contaminados y la radiación externa procedente del medio ambiente exterior producen la mayor parte de la exposición a la radiación a corto y largo plazo.

Los radionucleidos de vida corta contribuyen en mayor medida a la exposición en todas las vías durante los primeros días y semanas después de la emisión radiactiva. La exposición externa disminuye rápidamente en la primera fase del accidente. Sin embargo, la irradiación debida a exposición interna aumenta gradualmente, dependiendo de la estación del año, aunque después comenzará a disminuir debido a procesos ambientales de degradación y a la desintegración radiactiva. Algunos meses después, es el Cs-137, nucleido de vida larga, el que, durante décadas, más contribuirá a la exposición externa debida a la contaminación del suelo. La tasa de dosis disminuye debido a los procesos de eliminación ambiental de los radionucleidos más rápidamente que si sólo actuase la desintegración radiactiva. Este radionucleido está también presente e los alimentos, por lo que contribuye significativamente a la irradiación interna. También puede incorporarse al organismos a través de la alimentación otro radionucleido de larga vida, el Sr-90, especialmente en la zona más cercana al lugar de la emisión.

En el primer año después de producirse la contaminación en las zonas agrícolas se producirá un incremento de la dosis debida a la ingestión de alimentos contaminados. El tipo de productos y las condiciones de cultivo de cada área influyen de una manera diferente en la exposición.

Cuanto mayor sea la aportación de productos frescos y cultivos a la dieta, mayor será la ingesta de cesio. Si la deposición radiactiva se produce justo después de haber cosechado los productos, no se contaminarán los alimentos con radionucleidos de vida corta. La dosis por ingestión depende de la procedencia de los productos y puede ser baja si la mayoría de los alimentos son importados de regiones no contaminadas.

La ingestión de alimentos y agua contaminada puede evitarse o minimizarse si la dieta se basa en alimentos que se distribuyen comercialmente y el agua potable se suministra mediante camiones cisterna. La población, que se abastezca con productos de su propia granja o agua de sus pozos no protegidos, puede resultar expuesta al día siguiente de producirse la deposición radiactiva, especialmente si ésta ocurre durante la temporada de cosecha o cultivo.

7.3.3. INHALACIÓN

El periodo de tiempo en el que existe riesgo de exposición debido a la irradiación por inhalación no es muy grande. La deposición de las partículas radiactivas, y sobre todo, la lluvia, limpia el aire a través de un proceso de lavado. Si no hay precipitaciones, la deposición de las partículas radiactivas se produce más lentamente.

Sin embargo, el material radiactivo depositado puede resuspenderse y volver, incluso, al ciclo atmosférico. La causa de la resuspensión de éstas partículas puede ser el viento o alguna alteración debida a actividades humanas, como el tráfico, etc. La resuspensión depende el tipo de ambiente, siendo más importante en regiones áridas donde el terreno no está cubierto por una vegetación densa. La principal causa de la resuspensión en terreno rural es la turbulencia atmosférica que será mayor cuanto más rugoso es el terreno.

La fracción de partículas radiactivas resuspendidas a nivel de suelo disminuye fuertemente con el paso del tiempo. Después de la emisión accidental de elementos transuránidos al exterior, la resuspensión debe considerarse una nueva vía de exposición asociada a la inhalación.

Cuando la nube radiactiva llega a una población, se puede mantener limpio el aire del interior de las viviendas y edificios cerrando las ventanas herméticamente (confinamiento). Una vez que las partículas comienzan a depositarse, la concentración de radionucleidos puede aumentar en el interior de las casas y disminuir en el exterior. Después del paso de la nube radiactiva, es importante controlar el momento en que se pueden ventilar las viviendas para evitar una exposición innecesaria a partículas que hayan podido entrar en el interior del recinto durante el paso de la nube radiactiva.

La exposición interna debida a la inhalación de radionucleidos varía en función de la composición de la nube radiactiva y del tiempo que se ha estado expuesto a ella. El efecto barrera de las casas es variable, y carece de importancia una vez que la nube se ha alejado de la zona. La tasa de inhalación depende de la edad y la actividad física de las personas, por lo que influye en la incorporación de radionucleidos.

Los gases nobles, por sus propias características, no se metabolizan. El iodo radiactivo, sin embargo, en forma gaseosa se absorbe rápidamente en la corriente sanguínea, en la que es rápidamente transportado a la glándula tiroides. Cuando en la nube radiactiva se encuentran grandes cantidades de cerio y rutenio radiactivos , la dosis debida a la inhalación de partículas aumenta significativamente. Las partículas que procedan del propio combustible nuclear pueden estar formadas por productos de fisión de alta actividad, sin embargo, los radionucleidos procedentes de los elementos refractarios pueden constituir una alta proporción del material emitido. Esto puede provocar la aparición de puntos calientes en la zona afectada por la deposición radiactiva.

A través de la vía de inhalación directa raramente aparecen efectos sobre la salud. Sin embargo, si aparecen partículas calientes en el aire, es posible que éstas se adhieran durante un determinado tiempo al tracto respiratorio superior irradiando los tejidos adyacentes. En total, la contribución de la inhalación a la dosis total es relativamente pequeña, con la posible excepción de los radioiodos.

7.3.4. INGESTIÓN

Solamente algunos radionucleidos contribuyen de forma significativa a la dosis por ingestión. Son radionucleidos de vida corta como el I-131 y Sr-89, así como otros de vida larga como el Cs-134, el Cs-137 y el Sr-90. Las proporciones de estos radionucleidos en la deposición así como la estación del año influyen en el contenido presente en los alimentos y agua potable, y por lo tanto, en las dosis derivadas de la ingestión de éstos principalmente durante el primer año.

Los alimentos de **consumo diario** contribuyen en mayor medida al aumento de la dosis por ingestión. Normalmente son: leche, cerdo y ternera, cereales, verduras y fruta. El consumo de peces de agua dulce varía según la disponibilidad de cada zona. Los productos marinos no suelen presentar problema en situaciones de contaminación radiactiva. Sin embargo, los alimentos de origen silvestre son fuente de radiocesio a largo plazo.

La deposición inicial realizada directamente en **cultivos** agrícolas y pastos produce la máxima concentración de radionucleidos en alimentos. En este caso, el número de partículas radiactivas que se encuentran en éstos alimentos es mayor que en el caso de los alimentos silvestres.

Los vegetales y la fruta ingeridos **crudos**, así como la **leche**, son productos de especial interés. La transferencia de radionucleidos a los productos animales depende de su propia alimentación. Las **aves** de corral y los **cerdos** se alimentan frecuentemente con mezclas comerciales de alimentos durante todo el año, por lo que su contaminación interna no comenzará hasta que se alimenten con el cereal cosechado después de producirse la deposición de partículas provenientes de una emisión radiactiva.

A partir de un mes desde el inicio de la deposición radiactiva se deberá prestar más atención al **cesio** radiactivo y a su ingestión a través de los productos agrícolas, que a los radioiodos.

En **suelos orgánicos** la acumulación de cesio y por lo tanto su posible ingestión es mucho mayor que en suelos minerales, especialmente si la fertilización no está cuidadosamente equilibrada. A largo plazo, los alimentos procedentes de un entorno seminatural serán fuentes significativas de cesio radiactivo presente en la dieta. Algunos de estos alimentos son: champiñones, carne de caza, frutos silvestres, y peces de agua dulce, especialmente peces de pequeños lagos de bosques. Un caso particular es el de algunas regiones nórdicas, donde pueden encontrarse concentraciones elevadas de cesio radiactivo en los renos y en la carne de corzo, durante bastantes años.

Durante el primer año después de la deposición se recibirá la máxima dosis por ingestión, será cuando los productos alimenticios provenientes tanto de la agricultura como los de origen silvestre estarán más contaminados. En el segundo año, si las praderas naturales no se han usado regularmente como pasto para vacas lecheras o de carne, los productos agrícolas contribuirán relativamente poco a la dosis.

En las zonas en las que haya lagos y ríos, el **pescado** será una fuente significativa de Cs-137 hasta el tercer o incluso décimo año, dependiendo del grado de contaminación que tengan. Los terrenos boscosos producen setas, bayas, hierbas y carne de caza, los cuales, año tras año, suman una cantidad casi constante a la dosis interna. La dosis total ingerida depende mucho de la composición de la dieta.

El **agua** potable no es una fuente de contaminación interna si es tratada convenientemente antes del suministro. Cuando se ingiere agua directamente, sin potabilizar, la contaminación radiactiva presente variará en función del tipo de agua. Un gran depósito de agua, profundo, con un tiempo de renovación largo es óptimo. Las fuentes de agua subterránea están protegidas de la deposición y la escorrentía, especialmente aquellas que se usan como toma de agua potable. El agua de los pozos que no están debidamente protegidos de la escorrentía puede llegar a contener cantidades variables de radionucleidos. Las primeras aguas de lluvia son radiactivas y no deben utilizarse como agua potable.

Después de un accidente grave, la ingestión de estroncio radiactivo en áreas cercanas puede ser grande. La absorción de estroncio del suelo a través cultivos humanos y cultivos forrajeros no disminuye por lo general tan rápidamente como la del cesio por los propios procesos del suelo. La dosis ingerida puede llegar a ser significativa durante varios años.

El proceso y elaboración de determinados productos en la industria alimentaria y en los hogares puede disminuir la cantidad de material radiactivo presente y así reducir la dosis debida a la dieta.

Existen alternativas para reducir la ingestión de radionucleidos, basadas en las propiedades físico-químicas de los elementos, como por ejemplo, la fabricación de quesos tipo Emental o Edam o la cocción de setas, procesos eficientes para eliminar el cesio radiactivo.

Si la población conoce las medidas de control y las restricciones aplicadas, no debe esperarse la aparición de efectos deterministas debidos a la ingestión de radionucleidos. Caso de producirse un fuerte aumento de la concentración de

radioiodo, en una situación fuera de control, es posible que se produzca algún efecto directo sobre la salud. Entonces los niños pueden recibir altas dosis de iodo en el tiroides debido al consumo de leche y de otros productos frescos, tales como hortalizas. En casos extremos, pueden observarse deficiencias en el tiroides.

A través de la intervención se limitan los efectos estocásticos en la salud. Así, se aplican medidas de protección en la agricultura e industria alimentaria consiguiéndose reducir la ingesta humana de radionucleidos.

Modelos de cálculo de dosis

La concentración de radionucleidos en los distintos ecosistemas se ve afectada por un gran número de variables después de la deposición. Un instrumento eficaz para la protección radiológica sería aquel que calculase los cambios dinámicos en el ambiente, en los alimentos y en la tasa de dosis.

El modelo debe contener parámetros específicos propios del emplazamiento para ser de utilidad en la planificación de la intervención ante la emergencia. Los usuarios deberían validar los modelos para conseguir un nivel de confianza óptimo.

Existen programas sencillos que proporcionan modelos simples de cálculo de dosis, que también tienen que probarse y validarse antes de ser utilizados como instrumento de toma de decisiones. Los modelos de predicción no reemplazan a las medidas.

El modelo debe ser lo suficientemente flexible como para poder incorporar también las medidas que representen la situación real. Esto facilitaría la obtención de una visión general de la exposición del público en el transcurso de la deposición.

7.3.5. EXPOSICIÓN EXTERNA

Desde el comienzo de la deposición la población en el área afectada estará expuesta a la radiación externa. La radiación provendrá de isótopos contenidos en el penacho radiactivo, durante unas horas, y de las partículas radiactivas en el aire al nivel del suelo (dosis de inmersión), en la superficie del suelo y sobre otras superficies.

Inmediatamente después de la deposición la tasa de dosis en el exterior alcanzará su máximo debido a la existencia de multitud de nucleidos de vida corta emisores gamma. Los radionucleidos de vida larga decaen lentamente y contribuyen más significativamente a la dosis recibida a lo largo de toda la vida.

Las diferentes superficies tienen una capacidad diferente para acumular la deposición seca. En las zonas residenciales las superficies pavimentadas retienen menos material radiactivo que los suelos cubiertos por vegetación. En las zonas urbanas la eliminación de material radiactivo arrastrado por la lluvia en los edificios próximos es más rápida que la del las áreas rurales y por lo tanto, la radiación externa será mayor en las zonas rurales. En las zonas urbanas la dosis colectiva puede llegar a ser muy considerable debido a las grandes densidades de población existentes.

Las personas que permanezcan en el interior de edificios estarán protegidas de la radiación externa procedente de las partículas depositadas en el suelo. El confinamiento en bloques de pisos es mejor que el confinamiento en casas individuales, donde la distancia a la fuente es menor. El grosor del cemento de los muros de los bloques de pisos suele proteger más que otras estructuras típicas de casas más pequeñas. Cuando la deposición seca ya ha tenido lugar, y hasta que el agua de lluvia arrastre parte del polvo radiactivo, una fuente de dosis externa son los tejados. La superficie de los tejados como blindaje de la radiación es muy variable.

La exposición recibida durante la realización de actividades al aire libre puede ser preocupante en zonas rurales, especialmente cuando éstas actividades están vinculadas a la agricultura. Las actividades humanas, como la depuración de aguas residuales, puede redistribuir el material radiactivo, que puede concentrarse (por ejemplo en filtros) y alcanzar grandes actividades, que han de tenerse en cuenta desde el punto de vista de la protección radiológica.

Los lodos procedentes de las instalaciones de potabilización y depuración de agua pueden llegar a ser radiactivos en la fase inicial de la deposición. Su utilización en la agricultura y la silvicultura ha de ser controlada, por lo menos, durante los primeros meses.

La población puede contaminarse externamente si permanece en el exterior durante el paso del penacho. El tiempo de exposición no será largo, y cuando se descubra la situación, la eliminación de las zonas contaminadas será fácil (desvestirse) a excepción de las partes expuestas de la piel, que habrán de descontaminarse por otros medios, que serán indicados por el Grupo Sanitario.

En la primera etapa de una emisión descontrolada de radiactividad al exterior, los miembros del público que se encontraran el las inmediaciones del lugar del accidente y hubieran recibido una alta dosis de radiación pueden sufrir efectos deterministas. En lugares más alejados de la instalación accidentada sólo serán motivo de preocupación los efectos estocásticos (cáncer y efectos hereditarios). Las intervenciones tratan de minimizar estos efectos.

7.3.6. INFORMACIÓN PÚBLICA SOBRE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN

Para evitar tensiones innecesarias entre el público, las autoridades deben asegurarse de que se distribuye toda la información sobre la importancia de las distintas vías de exposición y sobre los riesgos asociados a la salud. La información tiene que ser veraz, coherente, comprensible y suficiente para llegar a todos los grupos de personas.

Durante la intervención, por ejemplo, cuando la disponibilidad de algunos tipos de alimentos está limitada temporalmente o son reemplazados por otros productos, los consumidores esperan un conocimiento profundo de los motivos y objetivos de las acciones adoptadas. La información relativa a las decisiones de las autoridades y de la industria alimentaria es importante para el fortalecimiento de la confianza entre los consumidores.

Es esencial un asesoramiento claro para los que estén aplicando las diversas medidas de protección. La credibilidad de las autoridades se puede mejorar con la

demostración de los beneficios obtenidos por la aplicación de dichas medidas, y mediante la organización de un seguimiento imparcial de los resultados de la intervención.
En una situación normal, debe informarse de la planificación a la población y no sólo a personas clave en la toma de decisiones, puesto que se requiere la aceptación de todo el público ante una situación de contaminación radiactiva.

7.3.7. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material.
2. Informe Técnico No. 364 de la OIEA: Manual de parámetros para la predicción de la trasferencia de radionucleidos en ambientes templados. 1994.
4. Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio, por el que se aprueba el Plan Básico de Emergencia Nuclear.