MÓDULO 4:

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

4.1 EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LA SALUD

4.2 VÍAS DE EXPOSICIÓN EN ACCIDENTES RADIOLÓGICOS

4.3 SISTEMAS DE LIMITACIÓN DE DOSIS

4.4 DOSIS DE RADIACIÓN Y MEDIDAS DE TASA DE DOSIS

Profesor: Vicente Gamo Pascual
PROINSA

4.1 EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LA SALUD

Objetivos

Después de este módulo, los participantes conocerán los fundamentos sobre los efectos que las radiaciones ionizantes ejercen en la salud así como las bases de la protección radiológica y cómo responder ante una emergencia.

Contenidos

- Generalidades
- Efectos Estocásticos
- Efectos Deterministas
- Cáncer
- Efectos Hereditarios
- Enfermedades debidas a la radiación
- Quemaduras por radiación
- Radiación y Embarazo

4.1.1. GENERALIDADES

Las radiaciones ionizantes afectan a la salud a nivel del genoma celular, actuando sobre las moléculas de ADN. El simple impacto de una partícula o de un fotón puede causar la rotura de la molécula de ADN. Si dicha rotura se da solo en una de las dos hebras del ADN (hebra sencilla), ésta será reparada con toda seguridad sin acarrear consecuencia alguna para la salud. Sin embargo, si el daño se produce en las dos hebras de ADN, caso también posible después de un simple impacto, puede ocurrir que los mecanismos de reparación fallen, pudiendo llegar a producirse mutaciones en el genoma.

Si la dosis de radiación recibida por el tejido es baja, la probabilidad de que ésta se traduzca en efectos sobre la salud será baja también (nunca será cero, a menos que la dosis haya sido cero). En la mayoría de los casos no se producirá ningún efecto sobre la salud, aunque siempre existirá una pequeña probabilidad, incluso habiendo recibido dosis muy bajas.

Aunque se produzca algún cambio en el genoma, dependerá de diversos factores que estos cambios se traduzcan en efectos sobre la salud. En primer lugar, la célula afectada tiene que dividirse, pues solo pueden producirse efectos en la salud si las células dañadas se dividen, formando dos células hijas portadoras del mismo defecto genético. A través de las sucesivas divisiones celulares, puede formarse un tumor maligno, que puede acabar matando a todo el organismo. Si la célula afectada original se tratase de un gameto, y éste diese lugar a un feto, el niño resultante y su descendencia podrían ser portadores de una enfermedad genética.

Si el genoma celular se ve dañado, la célula puede morir. Esto puede ocurrir de manera inmediata, destruyéndose la célula, o durante la división celular, en la formación de las dos células hijas. Un pequeño número de células muertas no dañan al organismo. Sólo ante una muerte masiva de células del órgano afectado puede correr peligro la salud o incluso la vida del organismo. Así, en la práctica, existe una dosis umbral, por debajo de la cual la radiación no causa efectos en la salud por muerte celular.

Los dos mecanismos vistos anteriormente constituyen la base de los efectos sobre la salud de las radiaciones ionizantes, dividiéndolos en Efectos Estocásticos y en Efectos Deterministas.

4.1.2. EFECTOS ESTOCÁSTICOS Ó PROBABILISTICOS

Los efectos **estocásticos** son aquellos que no presentan una dosis umbral por debajo de la cual no aparecen consecuencias. Su gravedad no depende de la dosis recibida, pues son siempre graves si suceden.

Hay dos tipos de efectos estocásticos conocidos. Si una célula cualquiera (células somáticas) del cuerpo sufre una mutación, puede llegar a transformarse en un **tumor** (cancerígeno o benigno). Si la célula mutada es un gameto (células germinales), éste puede tener como resultado un **efecto hereditario**.

La probabilidad de que se de un efecto estocástico se incrementa con la dosis. La gravedad de ese efecto no depende de la dosis recibida. La curva de respuesta para los efectos estocásticos se cree que es más o menos lineal, es decir, el riesgo por dosis es el mismo para dosis altas y bajas. Dado que la muerte celular limita el extremo superior de la curva, nunca se alcanza el 100% de la respuesta.

No se conoce exactamente la influencia de la tasa de dosis en la gravedad de los efectos estocásticos, pero es probable que no sea demasiado grande. Generalmente, se cree que un factor de dos para la tasa de dosis es adecuado de cara a protección radiológica. Esto significa que el riesgo ante una dosis recibida durante un largo periodo de tiempo es aproximadamente la mitad del riesgo de la misma dosis recibida en un periodo de tiempo muy corto.

Los efectos estocásticos aparecen tras unos años de latencia. El periodo de latencia más corto que se conoce es el de la leucemia, que puede aparecer después de dos años. Los efectos hereditarios pueden no aparecer hasta que hayan pasado varias generaciones. Es por ello que los efectos estocásticos a veces son llamados “efectos tardíos”. Sin embargo, este término no se recomienda, ya que algunos efectos deterministas también se pueden desarrollar después de varios años. Para una persona, el riesgo de padecer un efecto estocástico es bastante bajo, incluso después de recibir una dosis alta. Por otro lado, si se expone una población grande, la probabilidad de riesgo de cáncer en la población puede ser considerable, a pesar de que las dosis individuales sean bajas.

4.1.3. EFECTOS NO ESTOCÁSTICOS O DETERMINISTAS

Los efectos **deterministas** causan la muerte de la célula. Algunos ejemplos de dolencias por efectos deterministas son: vómitos, quemaduras por radiación, cataratas o efectos sobre el desarrollo por exposición del útero.

En contraste con los efectos estocásticos, para cada efecto determinista existe una **dosis umbral**, por debajo de la cual los efectos no aparecen. Los umbrales son, por lo general, bastante altos. No se aprecian efectos deterministas si se reciben dosis inferiores a la umbral. Sin embargo, una vez que el umbral se ha superado, el efecto es seguro ("determinista") y se agrava más rápidamente con el incremento de la dosis. Gráficamente, la curva de respuesta de dosis toma forma sigmoidea, comenzando después de un umbral y aumentando rápidamente, alcanzando pronto el 100% de la respuesta.

También en contraste con los efectos estocásticos, la tasa de dosis tiene una gran influencia tanto en el umbral de dosis como en la gravedad de los efectos. Pueden tolerarse dosis muy altas si éstas son recibidas durante un largo periodo de tiempo, ya que es posible que la división celular compense la pérdida de células dañadas por la radiación.

Los efectos deterministas aparecen generalmente tras un corto periodo de tiempo después de la exposición (efectos tempranos), aunque no siempre. Las cataratas, por ejemplo, son un efecto típico determinista que aparecen después de varios años.

4.1.4. CÁNCER (Efectos Estocásticos)

Desde la perspectiva de la salud pública, el cáncer es el efecto sobre la salud causado por las radiaciones ionizantes más importante. Se ha observado en varios grupos de población expuestos, que la incidencia del cáncer ha aumentado en comparación con los grupos de control. El grupo más importante es el integrado por personas expuestas a las bombas atómicas de Japón en 1945. Entre estas personas, la incidencia de leucemia comenzó a aumentar dos años después de la exposición y después, de manera gradual, comenzó a bajar. El incremento máximo se produjo antes de cumplirse el décimo año después de la exposición. Por el contrario, la incidencia de tumores sólidos comenzó a aumentar a los cinco años después de la exposición, pero este incremento fue continuo y parece que continuará hasta el final de la vida de los afectados. En realidad, se acentúa cuando la población expuesta es de mayor edad y la incidencia por cáncer natural se incrementa.

Se prevé que el índice de mortalidad por cáncer en el grupo japonés estará en torno al 10% por Sievert. Esto no incluye los casos no letales de cáncer. La curva de dosis de respuesta para tumores sólidos es prácticamente lineal. Sin embargo, para leucemia, el riesgo para dosis es mayor en las dosis altas que en las dosis bajas.

Este grupo de control fue expuesto a altas tasas de dosis. La exposición fue casi instantánea. Se cree que el riesgo de la exposición a una dosis baja es menor. De acuerdo con la Comisión Internacional de Protección Radiológica, el riesgo de mortalidad por cáncer durante la vida es del 5% por dosis colectiva para una

población expuesta a radiación crónica. El Sievert.persona es la unidad de medida de la dosis colectiva, que es el producto de la dosis efectiva media recibida por las personas del grupo, por el número de personas que componen dicho grupo. El riesgo individual varía en función de la edad y el sexo. El riesgo en niños es mayor. El riesgo de la población en edad de trabajar es del 4% por dosis colectiva.

En cualquier caso, cerca del 20% de la población en países industrializados morirán de cáncer. Por este motivo, a pesar de que la población haya estado expuesta a radiación procedente de una contaminación radiactiva, es posible que los casos extras de cáncer causados por dicha radiación nunca puedan reconocerse como un incremento, dadas las altas tasas previas de cáncer. Sin embargo, el aumento numérico de casos extras puede ser considerable. Por este motivo, deben adoptarse medidas para proteger al público y así tratar de reducir los casos de cáncer provocados por la radiación, independientemente de que se determinen o no como provocados por la radiación, por otros factores o por causas naturales.

Una de las principales causas de preocupación, tras un accidente nuclear con deposición generalizada, es el riesgo de cáncer en la población expuesta. Es muy improbable que, en zonas alejadas, las dosis recibidas por el público expuesto a la deposición del material radiactivo supere los umbrales de efectos deterministas en cualquier órgano, con la posible excepción de la glándula tiroides ya que como consecuencia de un accidente nuclear pueden aparecer cantidades considerables de iodo radiactivo. Dicho radioisótopo inhalado o ingerido, es absorbido rápidamente por la glándula tiroides, por lo que puede estar potencialmente expuesta a dosis de radiación mucho mayores que cualquier otro órgano. La irradiación debida al iodo radiactivo puede causar cáncer de tiroides o, en caso de dosis muy altas, deficiencias en la tiroides.

El accidente de Chernobyl ha mostrado que el riesgo de cáncer tiroideo después de un accidente nuclear es real y altamente significativo en niños expuestos. Las primeras experiencias han demostrado que personas expuestas a la radiación durante la infancia presentan un incremento de riesgo de cáncer tiroideo. Por el contrario, no existen evidencias claras en adultos.

Desde el accidente, aproximadamente 1000 niños en Bielorrusia, Ucrania y Rusia han desarrollado algún cáncer, la mayoría de ellos a causa de una exposición moderada. Han aparecido casos hasta a 500 Km. del lugar del accidente y algunos de estos niños fueron expuestos antes de nacer. Sin embargo muy pocos de los niños con cáncer, han muerto por la enfermedad.

Como la frecuencia de antecedentes de cáncer de tiroides en la infancia es muy baja, la inmensa mayoría de estos casos son producidos por la exposición. Esta es la única situación demostrable, ya que en general, es imposible saber si el cáncer que se desarrolla en una persona es causado por una exposición conocida en el pasado o no.

Si una persona sufre una exposición a la radiación accidental o es trabajador expuesto y transcurrido un tiempo padece un cáncer, estará convencida de que su cáncer fue causado por la radiación. Sin embargo, la aparición del cáncer probablemente no sea causada por la exposición a radiación.

4.1.5. EFECTOS HEREDITARIOS (Efectos Estocásticos)

La radiación puede causar cambios heredables en los gametos, pudiendo ser transmitidos a las generaciones futuras y aparecer como enfermedades hereditarias en la descendencia. Las mutaciones que surgen de esta manera no son exclusivas, es decir, que no aparecen características que puedan ser identificadas como resultado de mutaciones espontáneas debidas a la radiación. Por este motivo, no ha sido posible hasta el momento demostrar la existencia de los efectos genéticos en la población humana debidos a cualquier exposición de la radiación. Sin embargo, los experimentos en animales han demostrado que tales efectos existen. La ICRP ha estimado que el riesgo de enfermedad genética en la descendencia de una población expuesta puede ser 1.3% por Sievert.hombre, contando a todas las generaciones futuras. En una población en edad de trabajar, con exclusión de los niños, el riesgo calculado es de 0.8% Sievert.hombre.

4.1.6. SÍNDROME DE IRRADIACIÓN (Efectos Deterministas)

La respuesta de un organismo adulto a una exposición aguda (en un tiempo corto, del orden de minutos), de radiación penetrante que provenga de una fuente externa y que afecte a todo el organismo, se conoce como síndrome de irradiación. Se produce después de recibir una dosis de radiación penetrante a cuerpo entero de más de un Sievert.

Las primeras señales de la exposición aparecen después de un tiempo de latencia de una o dos horas y constará de malestar, náuseas y, posiblemente, vómitos. Aparecen síntomas prodrómicos graves en menos de una hora y apuntan a una dosis aguda con riesgo para la vida.

Los síntomas prodrómicos aparecen en el plazo de unos pocos días. El síndrome de irradiación se desarrolla completamente después de aproximadamente dos semanas. Los principales síntomas son debidos a la depresión de la médula ósea y se componen de leucopenia severa, sangrado espontáneo debido a la trombocitopenia y anemia. El daño a la mucosa gastrointestinal lleva a la diarrea y la perturbación en el equilibrio de líquidos. El pronóstico puede ser mejorado en gran medida por cuidados especiales en la atención hospitalaria, pero si la dosis recibida por la médula ósea ha sido de más de 6-8 Sievert, por lo general sigue la muerte en unas pocas semanas. Sin embargo, si el paciente sobrevive durante 6 semanas o más, el pronóstico es mucho mejor. Comienza la recuperación de la médula ósea y del intestino, y a largo plazo, es posible la recuperación completa.

Dosis tan elevadas solo se han visto en accidentes serios, a menudo en relación con fuentes grandes en manos equivocadas. Es muy poco probable que una población expuesta a las consecuencias de un accidente nuclear obtenga dosis tan altas, salvo en las inmediaciones del reactor. Ningún miembro de público, después del accidente de Chernobyl ha tenido el síndrome de irradiación. Esto se observó solamente en el personal de rescate después de trabajar en el lugar del accidente, donde 28 de ellos murieron de la enfermedad.

La enfermedad puede complicarse por dosis altas recibidas en determinados órganos. En un accidente, la exposición es a menudo heterogénea, en cuyo caso es posible que se den graves daños en un órgano a pesar de haber recibido una dosis moderada en la médula ósea. En el rescate de los trabajadores de Chernobyl, la situación fue complicada por los graves daños ocasionados al irradiarse la piel.

En el caso de una dosis crónica de varios sieverts, se puede desarrollar el síndrome de la médula ósea crónico. Sin embargo, las dosis de menos de 0.5 Sievert, ya sea aguda o crónica, no conducen a la inmunodeficiencia o a cualquier otra enfermedad crónica, aunque se manifiestan en ligeros a moderados cambios en el contaje de las células sanguíneas. Este hecho es importante para entender el por qué del control de la salud del personal expuesto a la radiación. En caso contrario, cualquier dolor o enfermedad podría atribuirse a la exposición a la radiación, desde reumatismo, dolor de muelas o la gripe.

4.1.7. QUEMADURAS POR RADIACIONES (Efectos Deterministas)

La piel es sensible a la radiación, especialmente a la radiación beta, la cual libera gran parte de su energía en la piel. Una dosis local alta causa enrojecimiento de la zona pasadas un par de horas. Dos semanas después el pelo de la zona se cae. La caída de todos los pelos se considera un indicador de amenaza para la vida después de una dosis a cuerpo entero de unos sieverts. Si la dosis local continua siendo alta, como ocurre después de un contacto directo de la piel con una fuente radiactiva de alta actividad, aparecerá una segunda oleada de enrojecimiento en 2-3 semanas. Esto puede terminar bien con descamación seca de la piel o, después de la aparición de ampollas con una descamación húmeda. A continuación se inicia la curación de los bordes de la úlcera. Sin embargo, si la dosis local ha sido muy alta, una tercera oleada de enrojecimiento puede ocurrir transcurridos unos meses. Esta es señal de que los vasos sanguíneos de la piel han sido dañados y ocluidos, y las úlceras y necrosis seguirán. Ese tipo de daños puede ser muy doloroso y la amputación puede ser la solución definitiva.

4.1.8. RADIACIÓN Y EMBARAZO

La radiación puede dañar al feto en crecimiento, debido a que la división celular es sensible a la muerte celular. Los efectos de la radiación dependen del estado del embarazo y de la dosis recibida.

En las primeras dos semanas después de la concepción, antes incluso de que se conozca el embarazo, la exposición a la radiación puede causar la muerte del embrión con resultado de un aborto temprano que nunca será conocido. Sin embargo, si el embarazo continua, la experiencia demuestra que el niño tiene muchas posibilidades de morir. No se ha informado de malformaciones que hayan surgido después de la exposición en este período.

El sistema nervioso central (SNC) es más sensible que cualquier otra estructura ante un efecto perjudicial en el útero. El periodo más crítico del desarrollo para el SNC es el comprendido entre las semanas 8-15 después de la concepción. Durante este período, de mayor sensibilidad, incluso una dosis relativamente baja de radiación,

puede resultar crítica y provocar algún tipo de deficiencia mental y / o microcefalia (cabeza de pequeño tamaño). Puede darse un retardo general en el crecimiento debido a la exposición en cualquier etapa del embarazo. Estos efectos nunca se han observado después de dosis menores de 100 mSv, aunque no ha sido posible determinar con exactitud el umbral de una influencia marginal sobre la inteligencia.

Casos de retraso mental grave han sido observados después de recibirse dosis de más de 500 mSv. Otros defectos del desarrollo, tales como defectos en los ojos, pequeñas anomalías óseas o defectos genitales, se han descrito en humanos después de recibir más de 1 Sv, como se ha visto en radioterapia. Deficiencia mental, cabeza pequeña, envergadura pequeña y corta estatura, pueden ser consideradas como "marcadores" de efectos de la radiación en el útero, y cualquier otro tipo de alteraciones del desarrollo no deben considerarse radiogénicas, incluso si se ha producido alguna exposición durante el embarazo. Una idea errónea y muy común es que las dosis pequeñas de radiación pueden causar grandes malformaciones por azar. Esto sería teóricamente posible solamente durante los primeros días tras la concepción, cuando el número de células embrionarias es muy baja. Como se ha dicho anteriormente, en la práctica este efecto nunca ha sido observado.

La exposición a la radiación durante el embarazo aumenta el riesgo de que el feto desarrolle cáncer a lo largo de su vida. Se ha calculado una dosis de 10 mSv al feto para que se de un riesgo suplementario de 6:10000, para llegar a desarrollar cáncer en la infancia antes de los diez años de edad. A esto se suma los antecedentes de riesgo de 20:10 000 de tener cáncer en la infancia. Por ello, la exposición profesional en el embarazo debe ser evitada.

Es muy improbable que la dosis recibida por el feto en una situación de lluvia radiactiva tenga repercusiones de efectos deterministas sobre el desarrollo fetal. No hay ninguna razón para abortar después de una dosis de algunas decenas de milisieverts. Una gran cantidad de abortos innecesarios fueron realizados en Europa tras el accidente de Chernobyl, debido a la ignorancia y el temor infundado.

4.1.9. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material.
2. Recomendaciones de 1990 del Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP-60).

4.2 VÍAS DE EXPOSICIÓN EN ACCIDENTES RADIOLÓGICOS

Objetivos

Al finalizar el curso, los participantes comprenderán las características generales de los accidentes radiológicos que puedan dar origen a exposición interna o externa de las personas. Tendrán conocimientos básicos acerca de las vías de exposición y los factores que afectan a las dosis interna y externa. Se describen brevemente los accidentes radiológicos que pueden ocurrir en las centrales nucleares y otras instalaciones, así como la explosión accidental de un arma nuclear.

Contenidos

- Tipos de accidentes
- Vías de emisión
- Exposición por radionucleidos en aire
- Vías de Exposición de radionucleidos depositados.

4.2.1. GENERALIDADES

En un accidente radiológico, las personas pueden estar expuestas a la radiación emitida por los radionucleidos que han sido incorporados en su organismo o a la radiación emitida por radionucleidos u otras fuentes de radiación externas al organismo. En el primer caso, se dice que la radiación causa exposición interna y que la dosis resultante es una dosis por irradiación interna. En el segundo caso, cuando la fuente de radiación se encuentra fuera del cuerpo e irradia órganos y tejidos, se habla de exposición externa y la consiguiente dosis se conoce como dosis por irradiación externa. La dosis total de radiación es la suma de las dosis interna y externa. Los efectos perjudiciales de la radiación dependen de la magnitud de la dosis total y de la tasa a la que se recibe.

4.2.2. TIPOS DE ACCIDENTES

Accidentes en una central nuclear

La magnitud de los accidentes en las centrales nucleares puede variar desde pequeños incidentes a accidentes de gran escala. La Escala Internacional de Accidentes Nucleares (INES) clasifica los sucesos en siete categorías de acuerdo a criterios específicos. Un accidente menor podría ser, por ejemplo, una fuga limitada de agua de refrigeración del circuito primario al interior del edificio de contención. Los radionucleidos liberados pueden permanecer en el interior de la planta y causar exposición a la radiación sólo a los trabajadores. La exposición podría ser interna, debida a la inhalación de radionucleidos, o externa debida a la contaminación del ambiente de trabajo o de la piel.

En un accidente a gran escala, las barras del combustible se podrían romper, la estanqueidad del circuito primario se podría perder y podrían ser liberadas grandes cantidades de radionucleidos dentro del edificio del reactor, contaminando la parte interior de la central. Se podría perder la estanqueidad de la contención y ser liberados a la atmósfera o al agua de refrigeración. Como consecuencia, los radionucleidos alcanzarían el medio ambiente y causarían exposición externa e interna a la gente a lo largo del camino recorrido por el penacho radiactivo. El accidente ocurrido en la central nuclear de Chernobyl es un ejemplo de accidentes a gran escala, pero también se han producido algunos otros pequeños accidentes en otras instalaciones nucleares.

Explosiones accidentales de armas nucleares

La explosión accidental de un arma nuclear es extremadamente improbable debido a los mecanismos de seguridad y, hasta el momento, no ha ocurrido ningún accidente grave. Sin embargo, si tal accidente se produjera la cantidad y la composición de radionucleidos producidos en la explosión dependería del tipo y de la potencia del arma. Aunque hay armas nucleares basadas en la fisión del uranio o del plutonio y en la fusión de los isótopos de hidrógeno, la composición de radionucleidos producidos sería bastante similar en ambos casos porque, en el caso de una explosión de fusión, es necesario una fisión previa para elevar la temperatura lo suficiente para que la reacción de fusión se pudiera producir. La composición de radionucleidos producidos también depende de si la explosión se produce a una determinada altura en la atmósfera, cerca de la superficie del suelo, bajo tierra o bajo el agua.

En caso de una fuerte explosión en la atmósfera, los radionucleidos producidos podrían dispersarse a la troposfera o la estratosfera debido al calor y la presión generados en la explosión. Los vientos dispersarían los radionucleidos por todo el planeta y los radionucleidos se depositarían lentamente durante años causando contaminación radiactiva atmosférica y deposición radiactiva en todo el mundo. Si la explosión se produjese cerca de la superficie del suelo la activación de los elementos químicos que componen el suelo podría además causar una fuerte incidencia local.

Si el arma nuclear explotase en su almacenamiento subterráneo se produciría, además de en una dispersión atmosférica, en una gran deposición local de materiales activados. En el caso de un incendio en el almacenamiento sin explosión nuclear, probablemente sólo se produciría la dispersión local de los materiales radiactivos. En este caso, la composición de los materiales radiactivos emitidos se limitaría a los radionucleidos presentes en el explosivo nuclear.

Accidentes a pequeña escala

También pueden ocurrir accidentes durante la producción o manipulación de fuentes o materiales radiactivos. Como consecuencia de ello, los materiales radiactivos pueden dispersarse en la zona de trabajo o al medio ambiente circundante. El material radiactivo puede dispersarse en el medio ambiente durante el transporte. El riesgo radiológico causado depende de la actividad de los radionucleidos y sus propiedades fisicoquímicas. La exposición resultante podría ser causada por la

inhalación de radionucleidos dispersados en el aire o por irradiación externa en el lugar de trabajo. En muchos casos, no habrá muchas personas expuestas, pero las dosis pueden ser altas.

Debido a que los efectos de los accidentes a pequeña escala suelen limitarse a áreas pequeñas y afectar a pocas personas, dichos accidentes menores no serán consideradas en el presente tema.

4.2.3. VÍAS DE EMISIÓN

En el caso de un accidente en una instalación nuclear, los radionucleidos pueden permanecer confinados en la planta o pueden ser liberados al exterior, como efluentes gaseosos y partículas (emisión de radionucleidos a la atmósfera) o efluentes líquidos (emisión de radionucleidos al medio acuático).

Emisión atmosférica de radionucleidos

Cuando los radionucleidos son liberados a la atmósfera, son transportados por el viento y por las corrientes de aire y se mezclan verticalmente por procesos turbulentos. Salvo en el caso de los radionucleidos en forma gaseosa, los radionucleidos se eliminarán progresivamente del penacho o nube radiactiva, por desintegración radiactiva o por deposición húmeda y seca. La deposición húmeda está causada por las lluvias, cuando las gotas de lluvia lavan y arrastran los radionucleidos hacia el suelo o hacia la superficie del agua. En el caso de la deposición seca, se produce la eliminación de las partículas por el efecto de la difusión y de la fuerza gravitatoria, sobre todo en el caso de partículas grandes que, además, arrastran otras más pequeñas durante su caída. Dependiendo de las condiciones meteorológicas puede haber grandes variaciones locales en la cantidad depositada de radionucleidos.

Emisión de radionucleidos al medio acuático

La liberación de radionucleidos al medio acuático puede producirse en centrales nucleares, plantas de reprocesamiento de combustible nuclear u otras instalaciones nucleares en las que, como consecuencia de un accidente, pueda haber una fuga de líquidos radiactivos, y estos líquidos se viertan en el agua de refrigeración o agua de proceso. La concentración de radionucleidos disminuye de forma inmediata debido a que se diluyen en grandes cantidades de agua. Al verterse estas aguas en un río, lago o en el mar, la concentración de radionucleidos se verá disminuida aún más.

El comportamiento, el transporte y dilución de radionucleidos en el medio acuático dependerá de la solubilidad de cada radionucleido (dependerá del estado físico-químico en que se encuentra) y del tipo y las propiedades del medio acuático receptor. Los materiales radiactivos pueden ser retirados del agua por procesos de sedimentación, existiendo un intercambio continuo de materia entre el agua y el sedimento mientras la actividad se dispersa.

Exposición a radionucleidos confinados

Los radionucleidos confinados en la central nuclear sólo pueden causar dosis a las personas presentes de la zona, expuestas a la radiación directa o dispersa procedente de ellos.

4.2.4. EXPOSICIÓN a RADIONUCLEIDOS EN AIRE

Dosis externas

Cuando una nube o pluma radiactiva llega a un lugar donde hay población, se produce, en una primera fase, la exposición a la radiación externa emitida por los radionucleidos que se encuentran en el aire. Si la nube llega a los pocos días de la emisión de radionucleidos causada por una explosión nuclear o accidente nuclear, ésta puede contener abundantes radionucleidos de vida corta. Si la nube tarda mucho más tiempo en llegar, la mayor parte de la actividad será debida a radionucleidos de vida larga.

La dosis por irradiación externa está causada principalmente por la radiación gamma. La absorción total de la radiación beta en el aire se produce a pocos metros, mientras que la radiación gamma puede atravesar cientos de metros antes de que la energía sea absorbida totalmente. La radiación alfa se absorbe en unos pocos centímetros. Por lo tanto, la exposición externa es causada por los radionucleidos que se encuentran no muy alejados del individuo afectado.

Cuando la nube o penacho llega, la tasa de exposición externa generalmente aumenta muy rápidamente y, después de alcanzar el máximo, la tasa de exposición empezará a disminuir, pero la disminución será claramente más lenta. Cuando la nube haya pasado y el aire esté limpio de nuevo, la radiación externa habrá desaparecido también.

La dosis por irradiación externa causada por la radiación directa desde la nube depende de la composición y concentración de radionucleidos en el aire y es proporcional a la actividad de los radionucleidos integrada a lo largo del tiempo.

Dosis interna (por inhalación de la nube contaminada)

Cuando la nube o pluma que contiene aerosoles radiactivos y gases llega, las personas se encontrarán sumergidas en la misma. Como consecuencia de ello, las personas empezarán a inhalar radionucleidos con el aire que respiren. El material radiactivo presente en el aire puede estar compuesto de partículas y de gases nobles. La exposición interna estará causada por aquellas partículas que entren en las vías respiratorias y se depositen en ellas. Debido a que los gases nobles no se depositan en las vías respiratorias y son químicamente inertes, su contribución a la dosis por inhalación puede ser despreciada. Cuando el aire vuelva a estar limpio de nuevo y, por tanto, la inhalación de radionucleidos termine, los órganos y tejidos seguirán siendo irradiados debido a los radionucleidos que siguen permaneciendo en el interior del cuerpo.

El comportamiento de las partículas radiactivas en el sistema respiratorio depende del tamaño de las partículas. La mayoría de las partículas de gran tamaño se depositan en las membranas mucosas de la nariz. Una parte de ellas se depositarán en la parte superior de las vías respiratorias. Si las partículas son insolubles serán eliminadas de las vías respiratorias por la mucosa o el transporte ciliar hasta la faringe y serán tragadas. Posteriormente, se comportarán como un material ingerido. Sólo las partículas más pequeñas y los gases pueden alcanzar a las partes más bajas de las vías respiratorias, como son los alvéolos pulmonares. En caso de que los radionucleidos presentes en las partículas y los gases sean solubles, serán transferidos a la sangre y, a continuación, a los distintos órganos y tejidos de acuerdo a su naturaleza química. Las partículas insolubles pueden desplazarse desde los pulmones, por distintos procesos de eliminación, a los ganglios linfáticos donde pueden permanecer mucho tiempo o desde donde serán eliminadas hacia los fluidos corporales. Los gases inertes o insolubles serán exhalados.

La dosis interna a un órgano o tejido de las vías respiratorias producida por la inhalación de radionucleidos dependerá del radionucleido, su cantidad y forma fisicoquímica, el tipo de radiación que emita y el tiempo que permanezca en ese órgano.

Los radionucleidos que emiten radiación beta y alfa o radiación gamma de baja energía son los más peligrosos cuando se considera la exposición a los tejidos de las vías respiratorias. La dosis de radiación es directamente proporcional a la actividad total integrada a lo largo del tiempo del nucleido en el órgano. La dosis total se puede calcular mediante la suma de la dosis a cada uno de los órganos y tejidos, multiplicada por un factor de ponderación específico de ese órgano o tejido. Otros órganos y tejidos fuera de las vías respiratorias también son irradiados por los radionucleidos depositados en los pulmones y como resultado del desplazamiento de los radionucleidos inhalados hacia otros órganos y tejidos desde las vías respiratorias.

En el caso de accidente nuclear en un reactor nuclear o una explosión nuclear, los nucleidos más importantes en aire son los isótopos de yodo, especialmente I-131, y los isótopos de Cesio (Cs-137 y Cs-134). Dependiendo del radionucleido y de las partículas que componen la nube, también hay otros radionucleidos, como Zr-95 ó Nb-95 e isótopos de Rutenio y Cerio, etc, que pueden contribuir sustancialmente a la dosis.

Dosis a la piel

La piel puede estar expuesta a los radionucleidos presentes en el aire o a partículas radiactivas depositadas en la piel. Los radionucleidos emisores de radiación beta, alfa o gamma de baja energía son más eficaces al impartir dosis a la piel, debido a que su radiación es absorbida casi totalmente en los tejidos de la piel. Si estos nucleidos están presentes en el aire pueden irradiar la piel sólo cuando se encuentran a poca distancia de ella. Las partículas pueden contener varios radionucleidos y su actividad total puede ser bastante elevada. Cuando una partícula se deposita en la piel y permanece en ella durante mucho tiempo provoca una alta dosis de radiación local en el punto en que se encuentre. Afortunadamente, estas partículas suelen permanecer en la piel sólo unas pocas horas, lo cual limita la dosis.

4.2.5. VÍAS DE EXPOSICIÓN A PARTIR DE LA DEPOSICIÓN DE RADIONUCLEIDOS

Dosis por irradiación externa por los radionucleidos depositados

Los radionucleidos presentes en la nube o penacho se depositarán en la superficie del suelo, del agua, de las casas y de la vegetación a lo largo de la trayectoria de la nube. En consecuencia, las personas están expuestas a la irradiación externa por parte de los radionucleidos presentes en su entorno. Como en el caso de la irradiación externa desde la nube, la dosis externa se produce principalmente por la radiación gamma. En un área abierta, la mayor parte de la exposición externa es causada por los radionucleidos depositados en un radio de unas pocas decenas de metros. Cuando la distancia es mayor, la probabilidad de que la radiación incida en las personas es insignificante. La rugosidad del terreno y otros obstáculos que reducen la intensidad de la radiación también limitan la zona que contribuye a la dosis. El campo de radiación será muy complicado en una zona donde haya casas y árboles.

Si el depósito contiene abundantes radionucleidos de vida media corta, la tasa de exposición será mayor al principio y se reducirá bastante rápidamente cuando éstos decaigan. A largo plazo, la tasa de exposición externa dependerá de la cantidad de radionucleidos de vida larga emisores gamma, y se reducirá en la misma medida que la actividad de estos radionucleidos decaiga. Además de por la desintegración radiactiva, la tasa de exposición externa también disminuirá debido a otros factores. La lluvia lava los radionucleidos de la vegetación al suelo. También puede lavar parte de los radionucleidos presentes en o sobre el suelo, hacia sumideros u otras zonas, y los radionucleidos pueden migrar a capas más profundas del suelo. Todos estos efectos meteorológicos disminuyen la tasa de exposición externa, adicionalmente a la que produce la desintegración radiactiva. Si la deposición se produce cuando hay una capa de nieve sobre el suelo, gran parte de la actividad emigrará hacia los cursos fluviales con el agua que se produzca al fundirse la nieve .

La dosis externa depende de la tasa de dosis, del tiempo durante el que una persona permanezca en la zona afectada por la radiación, y de los efectos de blindaje que producen la rugosidad del suelo, los edificios y otras estructuras. La actividad depositada en los árboles y los techos y paredes de los edificios, puede incrementar la tasa de dosis externa. Por lo tanto, la dosis externa obtenida es una combinación de varios factores y la estimación más fiable podría hacerse utilizando dosímetros personales.

Dosis interna (por ingestión) vía diferentes cadenas alimenticias

Los radionucleidos depositados en el medio acuático o terrestre pueden transferirse a los seres humanos a través de diferentes cadenas alimentarias. La importancia de la cadena alimentaria depende de la composición de radionucleidos depositados y de la estación en que se produzca la deposición. Durante el invierno, en las zonas donde la nieve cubre el suelo, la única forma de que los alimentos puedan contaminarse es que los animales inhalen aire contaminado o coman forraje contaminado en la explotación ganadera o en su almacenamiento. Además de la estación, la diversidad de plantas cultivadas, el tipo de ganado y los hábitos de alimentación afectan a la dosis interna de las personas. También hay grandes diferencias entre la contaminación

de los alimentos cultivados y los productos silvestres, como la caza, las setas, las bayas y los peces.

A la hora de considerar la dosis interna, es crucial la concentración de actividad de radionucleidos presentes en cada producto alimentario y el consumo que se hace de cada alimento. Los radionucleidos ingeridos con los alimentos se absorben en el tracto gastrointestinal. La cantidad absorbida de cada nucleido depende de su solubilidad. Después de que la sangre absorba los elementos radiactivos, estos serán distribuidos a los diferentes órganos y tejidos donde permanecerán por un tiempo, determinado por sus parámetros metabólicos específicos de cada órgano o tejido. La dosis de radiación a los órganos y tejidos depende de la cantidad de radionucleido, el tiempo que permanece en el órgano o tejido y del tipo de radiación que emite. La dosis interna total debido a la ingestión puede calcularse mediante la suma de las dosis recibidas por el consumo de los diferentes alimentos.

A continuación, se describe la transferencia de radionucleidos en los diferentes alimentos a través de las cadenas alimentarias, así como en el agua potable.

Leche

La leche y los productos lácteos son componentes importantes de la dieta en muchos países. La leche es probable que se contamine por isótopos radiactivos de yodo, cesio y estroncio. La contaminación de la leche será máxima cuando la deposición se produzca durante el período de pastoreo pero, incluso cuando el ganado se mantenga estabulado, se puede producir contaminación de la leche por inhalación e ingestión de radionucleidos presentes en el agua de bebida y en el forraje. También la alimentación mediante heno u otro tipo de forraje cosechado después del periodo de deposición es una vía de contaminación de la leche. El contenido de actividad de iodo en la leche se reducirá rápidamente debido a su corto periodo de semidesintegración, pero, debido al largo periodo de semidesintegración de Cesio y Estroncio, la disminución de sus concentraciones en la leche será lenta y seguirá, con cierto retraso, la disminución de las actividades de estos isótopos en el forraje.

Carne

Las vías que llevan a la contaminación radiactiva de la carne de vacuno son las mismos que los que llevan a la contaminación de la leche. Además, el comportamiento temporal de la contaminación de la carne es el mismo que en la leche, pero los radionucleidos en cuestión son sólo los isótopos de cesio. Como los cerdos y las aves de corral son a menudo alimentados por forraje producido durante el año anterior, en la primera fase el aumento de las concentraciones de cesio es más bien lenta hasta que se empiece a utilizar el forraje recolectado tras la deposición. La vías de contaminación de la carne de ovino dependerá de los hábitos de pastoreo. Si las ovejas se alimentan de productos vegetales cultivados, el comportamiento de la concentración de cesio radiactivo será similar al de la carne de vacuno, pero si son de pastoreo por zonas sin cultivar la concentración sigue más o menos el comportamiento observado en la caza.

El comportamiento de las concentraciones de actividad de cesio en la caza difiere de las de la ganadería. Los isótopos de Cesio permanecen en el medio forestal en forma

asimilable por las plantas y, por tanto, también para la caza durante mucho tiempo. Por lo tanto, la disminución de las concentraciones de actividad de cesio en la carne de caza es muy lento.

Cereales

Si la deposición se produce durante la estación de crecimiento, los radionucleidos serán transferidos a los cereales por contaminación directa y por absorción a través de las raíces. En caso de la contaminación directa, se pueden encontrar gran variedad de radionucleidos en los cereales, pero cuando la contaminación se produce a través de las raíces se incorporan fundamentalmente los isótopos de estroncio y cesio. Después de la cosecha los cereales se pueden contaminar únicamente en el almacenamiento por lo que sólo se contaminarán las capas superficiales.

Vegetales y frutas

Como en el caso de los cereales, las verduras de hoja ancha se pueden contaminar directamente con radionucleidos depositados en sus hojas o, más tarde, por la absorción de las raíces. En las primeras etapas, la contaminación de los vegetales de hoja ancha puede ser una importante vía de exposición interna. La principal contaminación de las legumbres, tubérculos, bulbos, etc. es por la absorción a través de las raíces.

Pescado y otros alimentos acuáticos

La contaminación radiactiva de los peces de agua dulce en lagos oligotróficos puede dar lugar a concentraciones elevadas de cesio y puede constituir una vía importante de exposición para el hombre. La concentración de cesio radiactivo en el agua y, por tanto, en los peces de agua dulce, depende del volumen de agua y del nivel de nutrientes, de la cantidad de actividad depositada en el agua y en su cuenca, del caudal, etc.. En mares y océanos, la incorporación de cesio por el pescado es mucho menor que en el agua dulce, debido a la mayor cantidad de agua y el mayor contenido de minerales del agua de mar. Sin embargo, los mejillones, algunas especies de algas y otros filtradores pueden incorporar rápidamente radionucleidos asociados a las partículas que filtran del agua de mar.

Productos silvestres

El cesio permanece disponible para las setas, las bayas y las plantas que crecen en el suelo forestal durante mucho tiempo. Así, se pueden encontrar concentraciones elevadas de cesio especialmente en las setas. Dependiendo de sus hábitos de alimentación, la carne de caza también puede contener altas concentraciones de cesio. Hay algunas cadenas alimentarias especiales, por ejemplo, *Liquen-carne de reno*, en la que se produce un enriquecimiento en la concentración de radiocesio y puede constituir una fuente considerable de cesio, en determinadas zonas geográficas. Sin embargo, la importancia de esta vía es muy variable dependiendo de los hábitos de consumo.

En las regiones árticas la concentración del radioisótopo Cs-137 es muy alta. El liquen ártico obtiene su alimento directamente de las partículas de polvo que se depositan

sobre él, reuniendo también concentraciones de polvo radiactivo. El reno caribú se alimenta del liquen en sus migraciones de verano incorporándolo a su organismo. Al regreso, los esquimales (nivel superior de la cadena alimentaria) comen los caribúes, incorporando la actividad de los animales.

4.2.6. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material.
2. Informe de las Naciones Unidas. Fuentes y efectos de la radiación ionizante. Informe de la Asamblea General. 1993.
3. Informe Técnico No. 295 de la OIEA. Medida de radionucleidos en alimentos y medio ambiente. 1989.
4. Guía de Seguridad No. 57 de la OIEA. Modelos genéricos y parámetros para el asesoramiento de los factores de transferencia ambiental en emisiones rutinarias. 1982.
5. Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la protección contra Radiaciones Ionizantes y para la seguridad de las fuentes de radiación. Guía de Seguridad Nº, 115. OIEA, 1996.
6. Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.
7. Directiva 3954/87/Euratom del Consejo de 22 de diciembre de 1987 por la que se establecen los máximos niveles de contaminación en alimentos tras un accidente nuclear o en caso de emergencia radiológica.

4.3 SISTEMAS DE LIMITACIÓN DE DOSIS

Objetivos

Proporcionar al personal del grupo sanitario, los conocimientos básicos sobre los principios y los criterios para la protección radiológica y la limitación de la dosis después de un accidente.

Después de este tema, los participantes conocerán los términos básicos y las magnitudes utilizadas en protección radiológica.

Contenidos

- Principios y criterios básicos de protección radiológica
- Intervención en situaciones de emergencia
- Técnicas y métodos para la limitación de dosis
- Limitación de la transferencia de radionucleidos en la cadena alimentaria
- Criterios internacionales de protección radiológica
- Cuestiones

4.3.1. PRINCIPIOS y CRITERIOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Los principios básicos de la protección radiológica son la **justificación**, la **optimización** y la **limitación** de las dosis individuales. Estos principios son la base de toda la normativa relacionada con protección radiológica y de los programas de protección radiológica.

Todas las actividades humanas que aumentan la exposición global a la radiación, como por ejemplo, el uso de dispositivos radiactivos o la producción de energía nuclear, se clasifican como **prácticas**. El resto de actividades humanas que disminuyen la exposición global a la radiación se clasifican como **intervenciones**. Las acciones protectoras o las contramedidas desarrolladas en situaciones de emergencia son el ejemplo más típico de intervención.

En las prácticas y en las intervenciones, es normal que existan exposiciones, y su magnitud es previsible. A veces, sin embargo, habrá una exposición potencial, pero no habrá certeza alguna de que se produzca. Este tipo de exposición se llama "exposición potencial", y también debe tenerse en cuenta.

La magnitud básica para la medida de la radiación es la energía absorbida por unidad de masa, y se denomina **dosis absorbida.** El nombre especial para la unidad de dosis absorbida es el Gray (Gy). La eficacia con la que un tejido humano es dañado es diferente según los distintos tipos de radiaciones ionizantes. La dosis absorbida, en un tejido u órgano, ponderada en función del tipo y la calidad de la radiación se llama **dosis equivalente**. No todos los individuos (ni sus órganos y tejidos) son igualmente sensibles a la radiación, de modo que los daños biológicos,

especialmente los efectos estocásticos, variarán dependiendo del órgano o del tejido irradiado, aún cuando todos ellos reciban la misma dosis (absorbida) y el mismo tipo de radiación. En consecuencia, la dosis equivalente a cada uno de los órganos y tejidos se multiplicará por un factor de ponderación de tejidos para tener en cuenta la sensibilidad del órgano a la radiación. La suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo a causa de irradiaciones internas y externas se llama **dosis efectiva**. El nombre de la unidad para ambas dosis, efectiva y equivalente, es el Sievert (Sv).

Desde el punto de vista de la justificación y la optimización, la magnitud más empleada es la dosis efectiva colectiva, que se define, para un grupo de personas y en su caso una población, como la suma de las dosis individuales de cada miembro del grupo o población.

En caso de accidente, se calcula en primer lugar las dosis a la población para cada vía de exposición, sin tener en cuenta las posibles medidas de protección. Estas son las llamadas **dosis previstas** (DP). La dosis empleada para una situación de intervención es la **dosis evitada** (DE) para cada vía, que es la dosis no recibida gracias a la aplicación de una medida de protección.

4.3.2. INTERVENCIÓN EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

La intervención en una situación de emergencia se justifica si sus beneficios, que incluyen el detrimento de la dosis evitable, son mayores que todos los inconvenientes asociados a la misma. En situaciones de emergencia en las que las dosis previstas se acerquen a los umbrales de los efectos deterministas graves para la salud, las acciones protectoras se justifican casi siempre a priori.

Para cualquier situación en la que se deba considerar una intervención, se mantendrán todas las exposiciones a las radiaciones ionizantes “tan bajas como sea razonablemente alcanzable” (criterio ALARA). Dicho criterio se refiere a la magnitud de dosis individual y al número de personas expuestas a la radiación (dosis colectiva) , teniendo en cuenta los factores económicos y sociales inherentes.

En una intervención, durante una situación de emergencia, la exposición se llevará a cabo considerando los niveles de intervención y niveles de acción. Los niveles de intervención se expresan en términos de dosis que se espera evitar mediante una acción de protección específica asociada a la intervención. Los niveles de acción son expresados en términos de concentración de actividad de radionucleidos en, por ejemplo, alimentos, agua y cultivos. Los niveles de intervención empleados para acciones inmediatas de protección, incluidos refugios, evacuaciones y profilaxis con iodo, corresponden a los especificados en el Anexo II del PLABEN y que corresponden a los fijados por el CSN siguiendo recomendaciones internacionales, como las publicadas por la UE, la ICRP y el IAEA.

4.3.3. TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA LIMITACIÓN DE DOSIS

La dosis que una persona recibe de fuentes externas de radiación depende de la distancia entre la fuente radiactiva y la persona, y del tiempo de irradiación. Dichas

dosis pueden reducirse interponiendo entre la fuente de radiación y las personas un material que atenúe la intensidad de ésta, constituyendo un blindaje, o poniéndose en la medida de lo posible lejos de la fuente. El tiempo dedicado en la realización de una actividad cerca de la fuente radiactiva, debe reducirse al mínimo.

La dosis interna se puede evitar si se asegura la no acumulación de la contaminación radiactiva en el cuerpo. Las principales vías de contaminación interna son la inhalación y la ingestión.

Límites de dosis

En el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, publicado en el Boletín Oficial del Estado nº 178 de julio de 2001, quedan fijados los distintos límites de dosis, tanto para trabajadores expuestos como para el público en general.

El límite de dosis efectiva para trabajadores expuestos será de 100 mSv durante un periodo de cinco años oficiales, sujeto a una dosis efectiva máxima de 50 mSv en cualquier año oficial. Sin embargo, la recomendación para el límite de dosis que se suele emplear, es de 20 mSv en un año. Las restricciones sobre la dosis efectiva son suficientes para garantizar la prevención de los efectos deterministas en todos los órganos y tejidos del cuerpo, excepto en la retina del ojo, que aporta una contribución insignificante a la dosis efectiva, y en la piel, que puede ser objeto de exposición localizada. Los límites de dosis equivalentes para el caso de exposición parcial del organismo serán de 150 mSv por año oficial para el cristalino y de 500 mSv por año oficial para la piel (promediado para 1 cm^2, con independencia de la zona expuesta).

El límite de dosis efectiva para los miembros de público es de 1 mSv por año oficial. No obstante, en circunstancias especiales, el Consejo de Seguridad Nuclear podrá autorizar un valor de dosis efectiva más elevado en un único año oficial siempre que el promedio, durante cinco años oficiales consecutivos, no sobrepase 1 mSv por año oficial. El límite para dosis equivalentes para el cristalino es de 15 mSv y de 50 mSv para la piel.

En situaciones accidentales graves no siempre es posible utilizar los límites de dosis. Tras el accidente, se recomienda mantener las dosis por debajo de los límites donde puedan producirse efectos deterministas graves para la salud. Estos límites pueden ser excedidos sólo en acciones de salvamento de vidas. Los que lleven a cabo tales acciones, deben ser trabajadores voluntarios, tendrán la formación adecuada y estarán debidamente informados de los riesgos que corren.

Para aplicar los valores máximos, se deben sumar tanto los valores de dosis interna como de dosis externa. La dosis se denomina externa si la fuente de radiación se encuentra fuera del cuerpo. Análogamente, si la fuente de radiación se encuentra en el interior del cuerpo, la dosis recibida se llama dosis interna.

Limitaciones técnicas

Durante el paso de una nube radiactiva, la dosis se puede reducir si las personas permanecen resguardadas en el interior de las instalaciones. Por ejemplo, si se utilizan sótanos, la dosis se puede reducir en un factor de diez o incluso más. Si las ventanas y las puertas están cerradas y los sistemas de ventilación apagados, tanto la dosis recibida por la inhalación de los radionucleidos como la contaminación de la piel también se pueden reducir. Después de que se haya confirmado que la pluma radiactiva ha pasado, es conveniente abrir las ventanas y encender los sistemas de ventilación para reducir la dosis debida a la concentración de los radionucleidos que puedan haber entrado en el edificio. El confinamiento esta justificado siempre y cuando no sea posible la evacuación.

Los medios de evacuación de urgencia y la salida temporal de personas de las zonas afectadas o que puedan resultar afectadas, están diseñados para evitar efectos deterministas graves y un riesgo alto de efectos estocásticos por dosis y tasas de dosis altas. Es más efectivo si se toman medidas preventivas, es decir, antes de que se produzca cualquier liberación de radionucleidos en el medio ambiente. La eficacia de la evacuación después de la liberación de materiales radiactivos al medio ambiente depende de la capacidad de transporte, de la rapidez en las comunicaciones entre las personas en el momento de la evacuación y de la capacidad de predecir la dispersión de radionucleidos en el medio ambiente. Es necesario tener en cuenta las dosis que pueden ser recibidas durante la evacuación.

Normalmente la función de la glándula tiroidea requiere una ingesta adecuada de iodo estable con el fin de sintetizar las hormonas tiroideas. En el caso del iodo radiactivo, esta propiedad hace de la tiroides su órgano objetivo. Después de la ingesta del isótopo radiactivo, la actividad presente en el tiroides llega a su punto máximo en aproximadamente un día. La incorporación del isótopo por el tiroides es detenida por el iodo estable. La profilaxis casi siempre está justificada si se pueden evitar dosis medias individuales en tiroides de 0,1 Sv para adultos. El riesgo de daños para niños es mayor que para adultos.

Vigilancia de exposición externa

Las dosis recibidas por irradiación externa, por lo general, se determinan mediante dosimetría externa. Para ello, se emplean los dosímetros personales, los cuales suelen ser calibrados para medir dosis equivalentes, tales como la dosis a una profundidad de 10 mm (dosis equivalente profunda) y así poder realizar una estimación conservadora de dosis efectiva debido a radiaciones penetrantes. De la misma manera, se emplean para conocer la dosis equivalente individual a una profundidad de 0,07 mm (dosis equivalente superficial) y así realizar una estimación de la dosis equivalente debido a radiaciones poco penetrantes.

La determinación de dosis por exposición interna se efectúa a partir de medidas de la actividad de los radionucleidos incorporados al organismo utilizando un contador de radiactividad corporal (CRC). La dosis efectiva comprometida se calcula teniendo en cuenta la hora de la incorporación y el metabolismo de eliminación del propio radionucleido. El control rutinario continuo de la dosis interna es difícil, y por ello, el principal objetivo es crear unas condiciones de trabajo tales que no impliquen la necesidad de hacer un seguimiento sistemático. La vigilancia de la glándula tiroidea se puede realizar midiendo la actividad de la tiroides.

Descontaminación

Si se sospecha que la ropa o la propia piel del individuo pudieran estar contaminadas, una simple acción de descontaminación sería desvestirse, lavarse y cambiarse de ropa. La ropa sospechosa de estar contaminada puede ser almacenada hasta ser medida para decidirse sobre su lavado o eliminación. No hay ningún nivel de intervención genérico para esta acción de protección, pero el sentido común dice que la atención se centra en aquellos individuos que han estado en las zonas contaminadas como consecuencia de un accidente. Si se han medido niveles extremadamente altos de contaminación cutánea, se deberán utilizar agentes específicos de descontaminación, siempre bajo supervisión médica.

Personal capacitado que disponga de equipos apropiados, puede encargarse de reducir los niveles de contaminación en edificios y superficies de terreno con bajo riesgo para la población. Pero hay que tener en cuenta que dependiendo de los niveles o la extensión de la contaminación, es posible que los trabajadores involucrados terminen recibiendo una cierta dosis. Es evidente que cuanto mayor sea la zona que necesita descontaminación, tanto más difícil será la tarea y menos eficaz podría ser como medida de descontaminación. También se requerirán medios de almacenamiento y eliminación definitiva de los residuos radiactivos. Para esta medida de protección, la justificación y optimización tendrá que ser sobre la base de dosis colectiva evitable.

4.3.4. LIMITACIÓN EN LA TRANSFERENCIA DE RADIONUCLEIDOS EN LA CADENA ALIMENTARIA

Los radionucleidos liberados accidentalmente en el medio ambiente pueden pasar a los alimentos y al agua potable. Las medidas de protección que se adoptan para evitar la dispersión de la contaminación en la cadena alimentaria y en el agua potable pueden dividirse en dos categorías:

- Aquellas que directamente restringen el consumo de alimentos y agua contaminada.
- Aquellas que limitan la transferencia de radionucleidos en la cadena alimentaria por la contaminación de la atmósfera, el suelo y el agua.

Ambas categorías consisten en un número diferente de acciones que en conjunto forman una estrategia para evitar las dosis de radiación para el consumidor. Los niveles de intervención de estas acciones se puede fijar independientemente para cada una de las categorías de alimentos, como la leche y los productos lácteos, la carne (vacuno o de cordero), pescado, cereales, hortalizas, raíces y tubérculos, hortalizas, frutas y agua potable.

Debe considerarse la viabilidad de las medidas preventivas, como la estabulación de los animales de pastoreo, su reubicación en zonas de pastos no contaminados o el suministro de piensos alternativos, ya que éstas son por lo general medidas menos

costosas y menos perjudiciales que aquellas destinadas al control de los alimentos contaminados.

4.3.5. CRITERIOS INTERNACIONALES DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Existe mucha normativa internacional relativa a la Protección Radiológica. Una de las más conocidas es la publicación de la OIEA: *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación* (Guía de Seguridad nº 115 de la OIEA,1996).

En la Unión Europea, la Directiva 96/29/EURATOM establece las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. Asimismo, han publicado el informe "Principios de Protección Radiológica Urgentes para Proteger a la Población en Caso de Liberación Accidental de Materiales Radiactivos".

Estas normas se basan principalmente en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). La ICRP es una organización no gubernamental de carácter científico. El último informe completo se presentó en 1991 (ICRP Publicación 60). Para la intervención después de un accidente, la ICRP ha publicado el informe "Principios de Intervención para la Protección del Público en una Emergencia Radiológica" (ICRP Report. 63).

4.3.6. BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material.
2. Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la protección contra Radiaciones Ionizantes y para la seguridad de las fuentes de radiación. Guía de Seguridad Nº, 115. OIEA, 1996.
3. Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.
4. Informe sobre los principios de protección radiológica para la toma de medidas de protección urgentes para proteger al público en caso de que se produzca una emisión de material radiactivo al exterior (Comisión Europea 1987)
5. Recomendaciones de 1990 del Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP-60).
6. Publicación 63 de la ICRP. Principios para la intervención en materia de protección del público en una emergencia radiológica. 1993.
7. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE núm. 178, de 26 de julio.

4.4 DOSIS DE RADIACIÓN Y MEDIDAS DE TASA DE DOSIS

Objetivos

Después de este tema se pretende que los alumnos tengan conocimientos relativos a las magnitudes y unidades dosimétricas y de los dispositivos utilizados para determinar la dosis y la tasa de dosis.

Contenidos

- Magnitudes dosimétricas y unidades
- Dosis y medida de la tasa de dosis.

4.4.1 GENERALIDADES

Las magnitudes dosimétricas se utilizan para describir los efectos de la radiación en los tejidos y órganos del cuerpo humano. Estas magnitudes y sus unidades se han desarrollado a la vez que los conocimientos científicos relativos a la protección radiológica. Las cantidades y unidades son descritas aquí en la forma que fueron dadas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en su publicación 60, 1991.

Dosis absorbida

Cuando la radiación ionizante interactúa con el material, la energía se transfiere de la fuente a la materia y es absorbida.

Teniendo esto en cuenta, la magnitud dosimétrica fundamental en protección radiológica es la **dosis absorbida**. Ésta es la energía absorbida por unidad de masa ponderada para un tejido u órgano. La unidad de dosis absorbida es el Gray (**Gy**), o julio por kilogramo. El gray es la unidad oficial en el sistema internacional. Normalmente se utilizan unidades más pequeñas como el milligray (mGy) y el microgray (μGy). Las conversiones son:

$1\ Gy = 10^3\ mGy = 10^6\ \mu Gy$
$1\ \mu Gv = 0.001\ mGv = 0.000001\ Gv$

Dosis equivalente

Los diferentes tipos de radiación ionizante -radiación gamma, partículas alfa, neutrones, etc.- con la misma dosis absorbida, pueden provocar efectos diferentes en los órganos.

Éste hecho se tiene en cuanta con la magnitud **dosis equivalente**, que multiplica la dosis absorbida por cada órgano por un factor relacionado con el tipo de radiación denominado "factor de ponderación" (W_R). Matemáticamente esto se expresa:

Dosis equivalente = factor de ponderación de la radiación x dosis absorbida
$H_{T,R} = W_R D_{T,R}$

El factor de ponderación de la radiación tiene un valor determinado para cada tipo de radiación:

Tipo y rango de Energía	W_R
Gamma y radiación beta	1
Partículas alfa	20
Neutrones	5-20, dependiendo de la energía

La unidad de dosis equivalente es el Sievert (Sv), o julios por kilogramo. (nota: Sv difiere del Gy solo por las dimensiones del factor de ponderación). También el sievert es una cantidad bastante grande y las unidades milisievert (mSv) y microsievert (µSv) se utilizan a menudo. las conversiones son:

1 Sv = 10^3 mSv = 10^6 µ Sv
1 u Sv = 0.001 mSv = 0.000001 Sv

Dosis efectiva

La gravedad de las radiaciones depende también del tejido u órgano que esté expuesto a ellas.

Para tener en cuenta este hecho, existe la magnitud denominada **Dosis Efectiva**. En ella se tiene en cuenta el factor de ponderación que representa la contribución relativa del órgano. Este factor de ponderación se denomina "factor de ponderación de los tejidos" (W_T), que tiene un valor concreto para cada tejido u órganos, como por ejemplo:

Tejido	W_T
Gónadas	0.20
Pulmón	0.12
Tiroides	0.05
Piel	0.01

En caso de que se reciba una dosis equivalente uniforme en todo el organismo, se considera al cuerpo como un tejido con factor de ponderación 1. Esta suposición es muy útil para el cálculo de la dosis recibida debido a la radiación gamma externa.

El factor de ponderación de tejidos se usa para calcular la dosis efectiva. Ésta será la suma de las dosis equivalentes ponderadas para todos los tejidos y órganos del cuerpo. La dosis efectiva tiene en cuenta tanto la calidad de la radiación como la sensibilidad de los diferentes tejidos, lo que permite comparar daños causados por distintos tipos de exposiciones. La probabilidad de sufrir efectos estocásticos (por

ejemplo, cáncer inducido por radiación) es directamente proporcional a la dosis efectiva. La dosis efectiva suele denominarse simplemente dosis, pero es recomendable indicar que es la eficaz cuando se esté utilizando esta magnitud.

EJEMPLO

Una persona recibe 0,1 Gy (dosis absorbida) en los pulmones por inhalación de partículas alfa, 0,5 Gy (dosis absorbida) en la piel por radiación externa beta y 0,2 Gy (dosis absorbida) en todo el cuerpo por radiación gamma externa. ¿Cuál es la dosis efectiva que ha recibido esta persona?

La dosis equivalente recibida para partículas α es 20 x 0.1 = 2 Sv.
La dosis equivalente recibida para radiación β es 1 x 0.5 = 0.5 Sv.
La dosis equivalente recibida para radiación γ es 1 x 0.2 = 0.2 Sv.

La dosis efectiva es la suma ponderada de las dosis equivalentes en todos los tejidos y órganos. Las contribuciones a la dosis efectiva recibida por los diferentes órganos o tejidos son los siguientes

Pulmón	0.12 x 2 Sv	=	0.24 Sv
Piel	0.01 x 0.5 Sv	=	0.005 Sv
Cuerpo entero	1 x 0.2 Sv	=	0.2 Sv
	Total	=	0.445 Sv

Respuesta : la dosis efectiva recibida es 0.445 Sv.

Nota: La dosis efectiva causada por la radiación γ externa de todo el cuerpo tiene el mismo valor numérico que la dosis absorbida y la dosis equivalente, porque tanto la radiación y los factores de ponderación de tejidos tienen un valor igual a 1.

4.4.2 MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS Y UNIDADES

Las magnitudes dosimétricas descritas anteriormente dependen de la energía de la radiación que haya sido transferida a los tejidos humanos. Dado que dicha transferencia no se puede medir directamente (ya que tendría que utilizarse para ello el propio tejido expuesto), deben usarse métodos indirectos.

Es factible construir dispositivos que midan la dosis absorbida en aire, en otro gas (cámaras de iotización) o en materia sólida. Esta información puede utilizarse para estimar la dosis absorbida recibida por un tejido, ya que el detector habrá estado expuesto a la misma radiación que el tejido. Además, las estimaciones para dosis equivalente son bastante buenas cuando se utilizan detectores que tengan unas propiedades de absorción similares a las de los tejidos humanos e incluso en algunos casos, los detectores se cubren con capas de materiales especiales que perfeccionan las medidas.

Las magnitudes determinadas se denominan magnitudes operacionales. La más importante de ellas es la dosis equivalente a una profundidad de 10 mm, (Hp_{10}) y a una profundidad de 0,07 mm ($Hp_{0.07}$). La Hp_{10} proporciona una estimación

conservadora de la dosis efectiva debida a radiaciones muy penetrantes y la $Hp_{0.07}$ proporciona una estimación superior de la dosis equivalente debida a radiaciones poco penetrantes.

Los dosímetros personales se utilizan para determinar la dosis equivalente personal recibida debida a radiación gamma externa. Los dosímetros más habituales hoy en día son los dosímetros de lectura directa electrónicos (DLDs electrónicos), dispositivos electrónicos con pantalla que permiten conocer la dosis recibida al instante y que están basados normalmente en la ionización gaseosa o en la detección mediante semiconductores. Otros dosímetros de uso habitual son los de película fotográfica y los TLD (termoluminiscentes). Ambos son pequeños dispositivos pasivos que detectan la dosis recibida total durante un cierto período de tiempo. El detector de material -un pequeño trozo de película o un cristal termoluminiscente -se coloca en un recipiente de plástico que se recubre por distintas capas de materia con distintas propiedades de absorción. De esta manera es posible identificar el tipo de radiación recibida y así se mejora la exactitud de estimación de dosis.

Los trabajadores llevan el dosímetro normalmente en el pecho, en la parte externa de las prendas de vestir, pero puede haber otras posibilidades, dependiendo de las condiciones. Las instrucciones a seguir serán indicadas por el personal de protección radiológica.

Detectores portátiles de Rayos X, gamma y neutrones

Los detectores portátiles se utilizan para controlar los campos de radiación con el fin de conocer de manera instantánea la exposición a radiación en el lugar de trabajo. Normalmente estos equipos muestran de manera continua el valor de la tasa de dosis en unidades µSv/h (microSievert por hora).

No deben utilizarse detectores de radiación para determinar la dosis recibida por los trabajadores, ya que la tasa de dosis es variable a lo largo del día, y la dosis recibida depende de otros factores como el tiempo de exposición o la distancia entre la fuente y el trabajador.

Sin embargo, para el caso de tasas de dosis constantes debidas a radiación gamma, puede estimarse de manera razonable la dosis efectiva multiplicando el promedio de lectura de tasa con el tiempo de permanencia en el campo de radiación. Matemáticamente esto se expresa:

$$\text{Dosis} = \text{tasa de dosis} \times \text{Horas} \quad (D = H \times h)$$

Por ejemplo, 8 horas de trabajo en un área donde la tasa de dosis externa para radiación gamma es 5 µSv/h provocaría una dosis de 40 µSv = 0.04 mSv.

Los detectores gamma normalmente son tubos Geiger-Müller. Las principales ventajas de estos tubos Geiger-Müller son que son bastante económicos, su rango de funcionamiento es muy amplio (normalmente de 0,1 mSv/h a 10 Sv/ h) y sus dimensiones son pequeñas. Podemos encontrarnos equipos con pantalla analógica (los más antiguos) o modelos con pantalla digital (los más modernos).

Es posible utilizar pequeños detectores Geiger-Müller como dispositivos personales con alarma. El dispositivo consiste en un tubo electrónico equipado con una alarma sonora y/o lumínica. Cuando se supera un valor prefijado de dosis o tasa de dosis esta alarma se activa. Algunos modelos están equipados con una pantalla, la cual muestra de manera continua la dosis recibida o la tasa de dosis. En realidad, esos modelos pueden utilizarse simultáneamente como dispositivo de alarma, y como dosímetro personal.

Otros detectores

Otro tipo de detector utilizado son los detectores de contaminación superficial. Éstos equipos están basados en el uso de cristales de centelleo o cámaras de ionización. Los detectores permiten la determinación de la contaminación radiactiva en ropa, piel y otras superficies. Los equipos de medida están equipados con una ventana (de una delgada capa de aluminio u otro material), que permite la detección de la radiación alfa y beta. A veces pueden conectarse al medidor sondas para la detección de distintos tipos de radiación.

Los detectores de neutrones son equipos bastante grandes y pesados. Por lo general, tienen alrededor de 10 Kg. de peso y sus dimensiones son superiores a los 20 centímetros. Por lo tanto, no son fáciles de manejar y utilizar en comparación con los detectores portátiles utilizados para la detección de rayos X o radiación gamma. El gran tamaño es debido a que el tubo de detección está cubierto por una gruesa capa de plástico que ofrece las propiedades necesarias para la interacción de los neutrones con la materia de manera análoga a como ocurriría en el cuerpo humano.

4.4.3 BIBLIOGRAFÍA

1. Project PH REG 06.4/97: Training on Off-Site Emergency Management in Central Eastern Europe Course Training Material