

Manual de bioseguridad en el laboratorio

Organización Mundial de la Salud

Parte 4 de 6

PARTE V Introducción a la biotecnología

16. Bioseguridad y tecnología del ADN recombinante

Consideraciones de bioseguridad en relación con los sistemas de expresión biológica
Consideraciones de bioseguridad en relación con los vectores de expresión
Vectores víricos para la transferencia de genes
Animales transgénicos y con genes inactivados (*knock-out*)
Plantas transgénicas
Evaluación de riesgos en relación con los organismos genéticamente modificados
Otras consideraciones

PARTE VI Seguridad química y eléctrica y protección contra incendios

17. Sustancias químicas peligrosas

Vías de exposición
Almacenamiento de sustancias químicas
Normas generales en relación con las incompatibilidades químicas
Efectos tóxicos de las sustancias químicas
Sustancias químicas explosivas
Derrame de sustancias químicas
Gases comprimidos y licuados

18. Otros peligros en el laboratorio

Peligro de incendio
Peligros eléctricos
Ruido
Radiaciones ionizantes



Issued as a publication by the World Health Organization in 2005 under the title *Manual de bioseguridad en el laboratorio*-tercera edición. ©World Health Organization 2005.

The Director-General of the World Health Organization has granted reproduction rights to Editora Médica Colombiana S.A., Colombia.

PARTE V Introducción a la biotecnología

16. Bioseguridad y tecnología del ADN recombinante

La tecnología del ADN recombinante entraña la combinación de información genética procedente de distintas fuentes para crear organismos genéticamente modificados (OGM) que pueden no haber existido antes en la naturaleza. En un principio, los especialistas en biología molecular expresaron cierta preocupación por la posibilidad de que esos organismos tuvieran propiedades impredecibles y perjudiciales y pudieran representar un riesgo biológico en caso de que salieran de los laboratorios. Esa preocupación fue el objeto de una conferencia científica celebrada en Asilomar (California, EE.UU.) en 1975 [45], en la que se debatieron cuestiones de seguridad y se propusieron las primeras directrices en materia de tecnología del ADN recombinante. La experiencia obtenida a lo largo de los más de 25 años de investigación que siguieron ha demostrado que la ingeniería genética puede desarrollarse en condiciones de seguridad cuando se realizan las debidas evaluaciones de riesgos y se adoptan las medidas de seguridad apropiadas.

La tecnología del ADN recombinante, también conocida como ingeniería genética, se utilizó por primera vez para clonar fragmentos de ADN en huéspedes bacterianos a fin de sobreexpresar productos génicos concretos destinados al estudio. Las moléculas de ADN recombinante también se han utilizado para crear organismos genéticamente modificados, como animales transgénicos o con genes inactivados (*knock-out*), así como plantas transgénicas.

Esta tecnología ya ha tenido un enorme impacto en la biología y la medicina, y probablemente tenga una influencia aún mayor en el futuro, ahora que se ha determinado la secuencia completa de nucleótidos del genoma humano. Gracias a la ingeniería genética podrán estudiarse decenas de miles de genes cuya función aún se desconoce. La terapia génica puede llegar a convertirse en el tratamiento habitual de ciertas enfermedades, y probablemente se obtengan nuevos vectores para la transferencia de genes mediante técnicas de ingeniería genética. Además, las plantas transgénicas producidas mediante esta tecnología pueden desempeñar un papel cada vez más importante en la agricultura moderna.

Los experimentos que supongan la creación o el uso de OGM deben realizarse después de efectuar una evaluación del riesgo biológico. Las propiedades patógenas y cualquier peligro potencial asociado a esos organismos pueden ser nuevos y no estar bien caracterizados. Hay que evaluar las propiedades del organismo donante, la naturaleza de las secuencias de ADN que van a transferirse, las propiedades del organismo receptor y las propiedades del entorno. Esos factores ayudarán a determinar el nivel de bioseguridad que se necesita para manipular sin riesgo el OGM resultante y a identificar los sistemas de contención biológica y física que habrá que emplear.

Consideraciones de bioseguridad en relación con los sistemas de expresión biológica

Los sistemas de expresión biológica constan de vectores y células huésped. Para que sean eficaces y puedan utilizarse sin riesgo, es preciso satisfacer varios criterios. Un ejemplo de sistema de expresión biológica es el plásmido pUC18, que se utiliza a menudo como vector de clonación en combinación con células de *Escherichia coli* K12 y ha sido completamente secuenciado. De su plásmido precursor pBR322 se han eliminado todos los genes necesarios para la expresión en otras bacterias. *E. coli* K12 es una cepa no patógena que no puede colonizar permanentemente el intestino del ser humano ni de los animales sanos. Pueden llevarse a cabo sin riesgo experimentos ordinarios de ingeniería genética en *E. coli* K12/pUC18 en el nivel de bioseguridad 1, siempre que los productos de la expresión de ADN extraño insertado no exijan mayores niveles de bioseguridad.

Consideraciones de bioseguridad en relación con los vectores de expresión

Puede ser necesario trabajar en niveles de bioseguridad más altos en los siguientes casos:

1. Cuando la expresión de secuencias de ADN derivadas de organismos patógenos pueda aumentar la virulencia del OGM.
2. Cuando las secuencias de ADN insertadas no estén bien caracterizadas, por ejemplo durante la preparación de genotecas de ADN genómico de microorganismos patógenos.
3. Cuando los productos génicos puedan tener actividad farmacológica.
4. Cuando los productos génicos sean toxinas.

Vectores víricos para la transferencia de genes

Los vectores víricos, por ejemplo los de adenovirus, se utilizan para transferir genes a otras células. Esos vectores carecen de ciertos genes necesarios para la replicación vírica y son propagados en líneas celulares que complementan el defecto.

Las poblaciones de esos vectores pueden contaminarse con virus que tienen intacta la capacidad de replicación, generados por sucesos poco frecuentes de recombinación espontánea en las líneas celulares de propagación, o procedentes de una purificación insuficiente. Esos vectores deben manipularse al mismo nivel de bioseguridad que el adenovirus del que proceden.

Animales transgénicos y con genes inactivados (*knock-out*)

Los animales que llevan información genética extraña (animales transgénicos) deben manipularse en niveles de contención apropiados para las características de los productos de los genes extraños. Los animales en los que se han suprimido de forma selectiva ciertos genes (*knock-out*) no suelen entrañar riesgos biológicos particulares.

Cabe citar como ejemplos de animales transgénicos los animales que expresan receptores de virus normalmente incapaces de infectar a esa especie. Si esos animales salieran del laboratorio y transmitieran el transgén a la población animal salvaje, en teoría podría generarse un reservorio animal de esos virus en particular.

Esta posibilidad se ha examinado en el caso de los poliovirus y es particularmente pertinente en el contexto de la erradicación de la poliomiелitis. Los ratones transgénicos, generados en distintos laboratorios, que expresaban el receptor de poliovirus humanos eran susceptibles a la infección por poliovirus por varias vías de inoculación, y la enfermedad resultante era análoga a la poliomiелitis humana desde los puntos de vista histopatológico y clínico. Sin embargo, el modelo murino difiere del ser humano en que la replicación de los poliovirus administrados por vía oral en el tubo digestivo es poco eficiente o no se produce. Por consiguiente, es muy poco probable que, de escaparse esos ratones transgénicos de un laboratorio, se generase un nuevo reservorio animal de poliovirus. A pesar de todo, este ejemplo indica que en cada nueva línea de animales transgénicos es preciso efectuar estudios detallados para determinar las vías por las que pueden infectarse los animales, el tamaño del inóculo necesario para que se produzca una infección y el grado de excreción de virus por parte de los animales infectados. Además, deben adoptarse todas las medidas posibles para garantizar una contención estricta de los ratones transgénicos receptores.

Plantas transgénicas

Las plantas transgénicas que expresan genes que confieren tolerancia a los herbicidas o resistencia a los insectos son actualmente objeto de una controversia considerable en muchos lugares del mundo. El debate gira en torno a la seguridad de esas plantas cuando se utilizan como alimentos, así como a las consecuencias ecológicas a largo plazo de su cultivo.

Las plantas transgénicas que expresan genes de origen animal o humano se utilizan para elaborar productos medicinales y nutricionales. Una evaluación del riesgo determinará el nivel de bioseguridad más apropiado para la producción de esas plantas.

Evaluación de riesgos en relación con los organismos genéticamente modificados

Las evaluaciones de riesgos para trabajar con organismos genéticamente modificados (OGM) deben tener en cuenta las características de los organismos donantes y los organismos receptores/huéspedes.

Entre los ejemplos de características que hay que tener presentes cabe citar:

Riesgos derivados directamente del gen insertado (organismo donante)

Es preciso realizar una evaluación en aquellas situaciones en las que el producto del gen insertado tenga una actividad biológica o farmacológica que pueda resultar dañina, como:

1. Toxinas.
2. Citoquinas.
3. Hormonas.
4. Reguladores de la expresión génica.
5. Factores de virulencia o potenciadores de la virulencia.
6. Secuencias oncogénicas.
7. Resistencia a antibióticos.
8. Alérgenos.

El examen de esos casos debe incluir una estimación del nivel de expresión necesario para conseguir actividad biológica o farmacológica.

Riesgos asociados al receptor/huésped

1. Susceptibilidad del huésped.
2. Patogenicidad de la cepa huésped, incluida la virulencia, la infectividad y la producción de toxinas.
3. Modificación de la gama de huéspedes.
4. Estado inmunitario del receptor.
5. Consecuencias de la exposición.

Riesgos derivados de la alteración de rasgos patogénicos existentes

Muchas modificaciones no utilizan genes cuyos productos sean intrínsecamente nocivos, pero pueden producirse efectos adversos como resultado de la alteración de características patogénicas o no patogénicas existentes. La modificación de genes normales puede alterar la patogenicidad. Para intentar determinar esos riesgos, pueden tenerse en cuenta los siguientes aspectos (la lista no es exhaustiva):

1. ¿Hay un aumento de la infectividad o la patogenicidad?
2. ¿Podría superarse cualquier mutación incapacitante en el receptor como resultado de la inserción del gen extraño?
3. ¿Codifica el gen extraño un determinante de patogenicidad de otro organismo?
4. Si el ADN extraño incluye un determinante de patogenicidad, ¿cabe prever que ese gen pudiera contribuir a la patogenicidad del OGM?
5. ¿Se dispone de tratamiento?
6. ¿Se verá afectada la susceptibilidad del OGM a los antibióticos u otra forma de tratamiento a consecuencia de la modificación genética?
7. ¿Podría conseguirse la erradicación del OGM?

Otras consideraciones

El uso de animales o plantas enteras con fines experimentales también merece una consideración cuidadosa. Los investigadores deben cumplir las normas, restricciones y requisitos para trabajar con OGM vigentes en los países y las instituciones en los que se desarrolla su labor.

Los países pueden contar con autoridades nacionales encargadas de elaborar directrices para trabajar con OGM que pueden ayudar a los científicos a clasificar su labor en el nivel de bioseguridad apropiado. En algunos casos la clasificación puede variar de un país a otro; quizá un país decida asignar el trabajo a un nivel más alto o más bajo cuando aparece nueva información sobre un nuevo sistema de vector/huésped.

La evaluación del riesgo es un proceso dinámico que tiene en cuenta los nuevos acontecimientos y los avances científicos. La realización de las debidas evaluaciones del riesgo garantizará que los beneficios de la tecnología del ADN recombinante sigan estando al alcance de la humanidad en los años venideros.

Para más información, consúltense las referencias 17 y 46 a 48.

PARTE VI Seguridad química y eléctrica y protección contra incendios

17. Sustancias químicas peligrosas

El personal que trabaja en los laboratorios de microbiología está expuesto no sólo a microorganismos patogénicos, sino también a los peligros que entrañan las sustancias químicas. Es importante que el personal tenga los debidos conocimientos acerca de los efectos tóxicos de esas sustancias químicas, las vías de exposición y los peligros que pueden estar asociados a su manipulación y almacenamiento (véase el anexo 5). Los fabricantes y/o proveedores de sustan-

cias químicas facilitan hojas informativas con datos sobre la seguridad de los materiales y otras informaciones sobre los peligros químicos. Esas hojas deben estar disponibles en los laboratorios donde se utilizan esas sustancias, por ejemplo como parte de un manual de seguridad o de operaciones.

Vías de exposición

La exposición a sustancias químicas peligrosas puede darse por las siguientes vías:

- 1. Inhalación.
- 2. Contacto.
- 3. Ingestión.
- 4. Jeringuillas.
- 5. Heridas en la piel.

Almacenamiento de sustancias químicas

En el laboratorio sólo deben conservarse las cantidades de sustancias químicas que sean necesarias para el uso diario. Las cantidades importantes deben guardarse en locales o edificios destinados especialmente a este fin.

Las sustancias químicas nunca deben almacenarse por orden alfabético.

Normas generales en relación con las incompatibilidades químicas

Para evitar los incendios y/o las explosiones, las sustancias que aparecen en la columna izquierda del **cuadro 13** deben almacenarse y manipularse de modo que no puedan entrar en contacto con las sustancias correspondientes de la columna derecha del mismo cuadro.

Efectos tóxicos de las sustancias químicas

Algunas sustancias químicas son perjudiciales para la salud de quienes las manipulan o inhalan sus vapores. Aparte de los venenos manifiestos, hay sustancias que tienen diversos efectos tóxicos. Las vías respiratorias, la sangre, los pulmones, el hígado, los riñones y el aparato digestivo, así como otros órganos y tejidos, pueden sufrir efectos adversos o padecer lesiones graves. Se sabe que ciertas sustancias químicas son cancerígenas o teratógenas.

La inhalación de los vapores de ciertos disolventes puede tener efectos tóxicos. Además de los efectos más graves antes señalados, la exposición puede provocar trastornos que, aunque no tengan efectos inmediatamente apreciables en la salud, en ocasiones producen síntomas como falta de coordinación, embotamiento y otros análogos, que pueden aumentar la propensión a los accidentes.

Cuadro 13. Normas generales en relación con las incompatibilidades químicas	
Categoría de sustancias	Sustancias incompatibles
Metales alcalinos, como el sodio, potasio, cesio y litio	Dióxido de carbono, hidrocarburos clorados, agua
Halógenos	Amoniaco, acetileno, hidrocarburos
Ácidos acético, sulfhídrico y sulfúrico, anilina, hidrocarburos	Agentes oxidantes, como los ácidos crómico y nítrico, los peróxidos o los permanganatos

La exposición prolongada o repetida a la fase líquida de muchos disolventes orgánicos puede provocar lesiones cutáneas. Ello puede deberse al efecto lipolítico de los disolventes, pero también pueden presentarse efectos corrosivos y alérgicos.

Para más información acerca de los efectos tóxicos de las sustancias químicas, véase el anexo 5.

Sustancias químicas explosivas

Las azidas, que a menudo se utilizan en soluciones antibacterianas, no deben entrar en contacto con el cobre ni el plomo (por ejemplo, en tuberías de desagüe y alcantarillado), ya que pueden explotar violentamente cuando se someten a un impacto, aunque sea ligero.

Los éteres que se conservan desde hace tiempo y que han cristalizado son sumamente inestables y potencialmente explosivos.

El ácido perclórico, si se deja que se seque en la madera, ladrillos o tejidos, explotará y provocará un incendio con el impacto.

El ácido pícrico y los picratos detonan por la acción del calor y los impactos.

Derrame de sustancias químicas

La mayoría de los fabricantes de sustancias químicas para laboratorios distribuyen gráficos que describen los métodos para tratar los derrames. También se encuentran en el comercio gráficos y estuches de material para casos de derrame. Los gráficos pertinentes deberán exponerse en el laboratorio en lugar destacado. También deberá disponerse del siguiente equipo:

1. Estuches especiales de material para derrames químicos.
2. Ropa protectora: guantes de goma fuertes, chanclos o botas de agua, mascarillas respiratorias.
3. Escobas y palas para el polvo.
4. Pinzas para recoger los trozos de vidrio.
5. Bayetas, trapos y toallas de papel.
6. Cubos.
7. Carbonato sódico (Na_2CO_3) o bicarbonato sódico (NaHCO_3) para neutralizar ácidos y sustancias químicas corrosivas.
8. Arena (para cubrir los derrames de sustancias alcalinas).
9. Detergente no inflamable.

En caso de que se produzca un derrame químico importante, debe procederse como sigue:

1. Notificar el incidente al funcionario de seguridad que corresponda.
2. Evacuar del local al personal no indispensable.

3. Atender a las personas que puedan haberse contaminado.
4. Si el material derramado es inflamable, extinguir todas las llamas desnudas, cortar el gas del local afectado y de los locales adyacentes, abrir las ventanas (si es posible), y cortar la electricidad de los aparatos que puedan producir chispas.
5. Evitar la respiración de vapores del material derramado.
6. Establecer una ventilación de salida si es posible hacerlo con seguridad.
7. Obtener el material necesario (véase más arriba) para limpiar el material derramado.

Gases comprimidos y licuados

En el **cuadro 14** se ofrece información sobre el almacenamiento de gases comprimidos y licuados.

Si se desea más información, véanse las referencias 1 y 49 a 51, y el anexo 5.

18. Otros peligros en el laboratorio

El personal que trabaja en el laboratorio puede enfrentarse a peligros debidos a formas de energía como el fuego, la electricidad, las radiaciones o el ruido. En este capítulo se ofrece información acerca de cada una de ellas.

Peligro de incendio

Es indispensable que haya una estrecha cooperación entre los funcionarios de seguridad y los servicios locales de prevención de incendios. Aparte de los riesgos debidos a las sustancias químicas, deben examinarse los efectos del incendio en la posible diseminación de material infeccioso. Esto puede ser determinante a la hora de decidir si es preferible extinguir o contener el incendio.

Conviene contar con la ayuda de los servicios locales de prevención de incendios para la capacitación del personal del laboratorio en lo que se refiere a la prevención de incendios, las medidas inmediatas en caso de incendio y el uso del equipo de lucha contra incendios.

En cada sala y en los pasillos y vestíbulos deben figurar de forma destacada advertencias sobre incendios, instrucciones e indicaciones de las vías de salida.

Cuadro 14. Almacenamiento de gases comprimidos y licuados	
Recipiente	Información sobre el almacenamiento
Bombonas de gas comprimido y recipientes de gas licuado ^{a,b}	■ Se fijarán de forma segura (por ejemplo, con una cadena) a la pared o a una mesa sólida, para que no puedan soltarse inadvertidamente. ■ Se transportarán debidamente tapadas y en carretillas. ■ Las bombonas de reserva se guardarán en otro edificio a alguna distancia del laboratorio; el local estará bien cerrado y debidamente identificado. ■ No se situarán cerca de radiadores, llamas desnudas u otras fuentes de calor, aparatos eléctricos que produzcan chispas o bajo la luz solar directa.
Bombonas pequeñas de gas de un solo uso ^{a,b}	■ No deben incinerarse.
^a La válvula principal de alta presión debe cerrarse cuando el equipo no esté en uso y cuando el local esté vacío.	
^b Los locales donde se utilicen bombonas de gas inflamable deben identificarse mediante signos de advertencia en las puertas.	

Las causas más comunes de incendios en los laboratorios son las siguientes:

1. Sobrecarga de los circuitos eléctricos.
2. Mal mantenimiento de la instalación eléctrica, como cables mal aislados o con el aislante en mal estado.
3. Tuberías de gas y cables eléctricos demasiado largos.
4. Equipo que se deja conectado sin necesidad.
5. Equipo que no está diseñado para el laboratorio.
6. Llamas desnudas.
7. Tuberías de gas en mal estado.
8. Manipulación y almacenamiento indebidos de material inflamable o explosivo.
9. Separación indebida de sustancias químicas incompatibles.
10. Aparatos que producen chispas en las proximidades de sustancias y vapores inflamables.
11. Ventilación indebida o insuficiente.

El equipo de lucha contra incendios debe colocarse cerca de las puertas de las salas y en puntos estratégicos de los pasillos y vestíbulos. Ese equipo debe comprender mangueras, cubos (de agua o arena) y un extintor. Los extintores deben ser inspeccionados y mantenidos periódicamente y debe respetarse su vida útil. En el **cuadro 15** se indican los tipos y usos particulares de los extintores de incendios.

Para más información consúltese la referencia 49.

Peligros eléctricos

Es indispensable que todas las instalaciones y el equipo eléctricos sean inspeccionados y probados con regularidad, incluida la toma de tierra.

Los circuitos eléctricos del laboratorio que lo requieran deben disponer de interruptores de circuito e interruptores por fallo de la toma de tierra. Los interruptores de circuito no protegen a las personas: están concebidos para proteger los cables de las sobrecargas eléctricas y con ello evitar los incendios. Los interruptores por fallo de la toma de tierra tienen por objeto proteger a las personas contra los choques eléctricos.

Todo el equipo eléctrico del laboratorio debe tener toma de tierra, preferiblemente mediante enchufes de tres espigas.

Cuadro 15. Tipos y usos de extintores de incendios

Tipo	Uso	No usar para
Agua	Papel, madera, tejidos	Incendios eléctricos, líquidos inflamables, metales incendiados
Gases extintores de CO ₂	Líquidos y gases inflamables, incendios eléctricos	Metales alcalinos, papel
Polvo seco	Líquidos y gases inflamables, metales alcalinos, incendios eléctricos	Equipo e instrumentos reutilizables, pues los residuos son muy difíciles de eliminar
Espuma	Líquidos inflamables	Incendios eléctricos

Todo el equipo eléctrico del laboratorio debe ajustarse a las normas y los códigos nacionales de seguridad eléctrica.

Ruido

El exceso de ruido es perjudicial con el tiempo. Algunos tipos de equipo de laboratorio, como ciertos sistemas de láser, así como las instalaciones que albergan animales, pueden exponer a los trabajadores a un ruido considerable. Pueden realizarse mediciones del ruido para determinar el riesgo correspondiente. Cuando así lo justifiquen los datos, cabe estudiar la posibilidad de instalar controles técnicos como cubiertas o barreras en torno al equipo ruidoso o entre las zonas ruidosas y otras zonas de trabajo. En los lugares donde no pueda reducirse en nivel de ruido y el personal del laboratorio sufra habitualmente una exposición excesiva, debe ponerse en marcha un programa de conservación de la audición que incluya el uso de protección auditiva cuando se trabaja en condiciones de ruido excesivo y un programa de vigilancia médica para determinar los efectos del ruido en los trabajadores.

Radiaciones ionizantes

La protección radiológica trata de proteger a los seres humanos contra los efectos perjudiciales de las radiaciones ionizantes, entre los que se incluyen los siguientes:

1. Efectos somáticos, por ejemplo síntomas clínicos observables en las personas expuestas. Entre ellos figuran los tumores inducidos por radiaciones, como la leucemia y los cánceres de hueso, pulmón y piel, cuya aparición puede producirse muchos años después de la irradiación. Entre otros efectos somáticos menos graves figuran lesiones cutáneas leves, alopecia, trastornos hematológicos, lesiones gastrointestinales y formación de cataratas.
2. Efectos hereditarios, es decir síntomas observados en los descendientes de los individuos expuestos. Los efectos hereditarios de la exposición de las gónadas incluyen las lesiones cromosómicas y las mutaciones génicas. La irradiación de las células germinales de las gónadas en dosis elevadas también puede provocar la muerte celular, que produce trastornos de la fecundidad en ambos sexos o cambios menstruales en las mujeres. La exposición del feto, particularmente entre las semanas 8a a 15a del embarazo, puede aumentar el riesgo de malformaciones congénitas, deficiencias mentales o cánceres inducidos por la radiación más adelante en la vida.

Principios de la protección contra las radiaciones ionizantes

Para limitar los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, el uso de radioisótopos debe ser controlado y cumplir las normas nacionales aplicables. La protección contra las radiaciones debe seguir cuatro principios:

1. Reducir al mínimo el tiempo de exposición a la radiación.
 2. Aumentar al máximo la distancia de la fuente de radiación.
 3. Proteger la fuente de radiación.
 4. Sustituir el uso de radionúclidos por técnicas no radiométricas.
1. **Tiempo.** El tiempo de exposición durante las manipulaciones de material radioactivo puede reducirse de las siguientes formas:
 - Practicando técnicas nuevas y aún poco conocidas sin utilizar el radionúclido hasta que se dominen esas técnicas.

- Trabajando con los radionúclidos de forma concienzuda y oportuna, sin prisas.
- Velando por que todas las fuentes radioactivas se devuelvan a su lugar de almacenamiento inmediatamente después de usarlas.
- Retirando los residuos radioactivos del laboratorio a intervalos frecuentes.
- Pasando el menor tiempo posible en la zona de radiaciones del laboratorio.
- Gestionando y planificando con eficiencia el tiempo de manipulación de material radiactivo en el laboratorio.

Cuanto menos tiempo se pase en un campo de irradiación, menor será la dosis personal recibida, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$\text{Dosis} = \text{Intensidad de la dosis} \times \text{Tiempo}$$

2. **Distancia.** La intensidad de la dosis de la mayor parte de las radiaciones γ y X es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente:

$$\text{Intensidad de la dosis} = \text{Constante} \times \text{Distancia}^2$$

Si se duplica la distancia a la fuente de radiación, la exposición queda reducida a la cuarta parte en el mismo periodo de tiempo. Se utilizan diversos dispositivos y aparatos auxiliares para aumentar la distancia entre el trabajador y la fuente de radiación, como pinzas largas, abrazaderas y pipeteadores a distancia. Obsérvese que un pequeño aumento de la distancia puede dar lugar a una disminución considerable de la intensidad de la dosis.

3. **Blindaje.** Los blindajes que absorben o atenúan la radiación, situados entre la fuente y el trabajador u otros ocupantes del laboratorio, ayudarán a limitar su exposición. El tipo y el grosor de cualquier material de blindaje dependen de la capacidad de penetración (tipo y energía) de la radiación. Una barrera de 1,3–1,5 cm de material acrílico, madera o metal ligero protege contra partículas β de alta energía, mientras que para proteger contra las radiaciones γ y X de alta energía se necesita plomo de alta densidad.
4. **Sustitución.** Los materiales basados en radionúclidos no deben utilizarse si hay otras técnicas disponibles. Si no es posible la sustitución, se utilizará el radionúclido que tenga el menor poder de penetración o la menor energía.

Sistemas seguros de trabajo con radionúclidos

Las normas relativas al trabajo con sustancias radiactivas deben tener en cuenta cuatro zonas:

1. Zona de radiaciones.
2. Zona de mesas de trabajo.
3. Zona de desechos radiactivos.
4. Registros y respuesta a las emergencias.

Entre las normas más importantes para trabajar con radionúclidos figuran las siguientes:

1. Zona de radiaciones

- Sólo se deben utilizar sustancias radiactivas en zonas exclusivamente destinadas a ello.

- Sólo se permitirá la presencia del personal indispensable.
- Se utilizará equipo de protección personal: batas de laboratorio, gafas de seguridad y guantes desechables.
- Se vigilarán las exposiciones del personal a las radiaciones.

Los laboratorios en los que se utilizan radionúclidos deben diseñarse de modo que se simplifiquen las operaciones de contención, limpieza y descontaminación. La zona de trabajo con radionúclidos debe situarse en una pequeña sala adyacente al laboratorio principal o en una zona exclusiva dentro del laboratorio, separada de otras actividades. La entrada a la zona de radiaciones se demarcará con el símbolo internacional de radiación (**figura 12**).

2. Zona de mesas de trabajo

- Utilizar bandejas para derrames cubiertas con material absorbente desechable.
- Limitar las cantidades de radionúclidos.
- Blindar las fuentes de radiación en las zonas de radiaciones, de mesas de trabajo y de desechos radiactivos.
- Marcar los recipientes de materiales radiactivos con el símbolo apropiado, anotando también la identidad del radionúclido, su actividad y la fecha del análisis.
- Utilizar medidores de la radiación para vigilar las zonas de trabajo, la ropa protectora y las manos una vez terminado el trabajo.
- Utilizar para el transporte recipientes debidamente blindados.

3. Zona de desechos radiactivos

- Retirar con frecuencia los desechos radiactivos de la zona de trabajo.

4. Registros y respuesta de emergencia



Figura 12. Símbolo internacional de peligro de irradiación.

- Mantener registros apropiados del uso y la eliminación de material radiactivo.
- Repasar los registros dosimétricos para ver si hay materiales que superan los límites de dosis.
- Elaborar y poner en práctica periódicamente planes de respuesta de emergencia.
- En caso de emergencia, prestar ayuda en primer lugar a las personas heridas.
- Limpiar concienzudamente las zonas contaminadas.
- Pedir asistencia a la oficina de seguridad, si existe.
- Redactar y mantener informes sobre los incidentes.

Authorized reprint by WHO