



INGENIERÍA AMBIENTAL

Fundamentos • Sustentabilidad • Diseño

JAMES R. MIHELICIC - JULIE BETH ZIMMERMAN

Apoyo en la



Alfaomega

capítulo/Seis Riesgo ambiental

James R. Mihelcic
y Julie Beth Zimmerman

En este capítulo los lectores aprenderán sobre la distinción entre un químico peligroso y tóxico, el significado de riesgo ambiental y los métodos para la evaluación del riesgo ambiental y su incorporación a la práctica de la ingeniería. Los lectores también aprenderán acerca de los cuatro componentes de una evaluación completa de riesgo ambiental (evaluación de peligro, evaluación de la dosis-respuesta, evaluación de exposición y caracterización del riesgo), el impacto de las condiciones específicas del sitio expuesto a químicos y las maneras en que el uso de la tierra a la larga afecta al riesgo ambiental. Finalmente, el capítulo demuestra las diferencias en el desarrollo de una caracterización del riesgo para compuestos carcinógenos y no carcinógenos. El énfasis está en la determinación del riesgo debido a la exposición a químicos contaminados encontrados en el agua, el aire y los alimentos. El capítulo también demuestra el método utilizado para determinar concentraciones químicas permisibles en el agua subterránea y el suelo contaminado.

Secciones principales

- 6.1 Riesgo y la ingeniería
- 6.2 Percepción de riesgo
- 6.3 Residuos peligrosos y químicos tóxicos
- 6.4 Ética y riesgo de la ingeniería
- 6.5 Evaluación del riesgo
- 6.6 Problemas más complicados con por lo menos dos rutas de exposición

Objetivos de aprendizaje

1. Describir cómo minimizar o eliminar el riesgo mediante el diseño para el peligro reducido y/o la exposición reducida.
2. Resumir los diferentes tipos de peligro y sus impactos potenciales adversos en la salud humana y el medio ambiente.
3. Articular las limitaciones del paradigma de la evaluación del riesgo para la protección de la salud humana y el medio ambiente y los factores que afectan la toxicidad de un químico determinado, incluyendo la incertidumbre asociada con la recolección e interpretación de datos.
4. Definir los cuatro componentes de una evaluación de riesgo y comentar la diferencia entre la evaluación de riesgo y la percepción de riesgo.
5. Calcular la concentración aceptable y el riesgo aceptable asociados con la exposición a un químico carcinógeno y uno no carcinógeno mediante varias y múltiples vías de exposición, incluyendo la partición química entre el suelo, el aire y las fases del agua.
6. Entender la relación entre la bioacumulación/bioconcentración, ciclos de la cadena alimentaria y toxicidad.
7. Definir los términos *justicia ambiental* y *poblaciones susceptibles* con relación a la evaluación del riesgo, y explicar los roles que los ingenieros pueden jugar en el direccionamiento de dichos temas.
8. Desarrollar una evaluación de riesgo básica para los carcinógenos y los no carcinógenos con los datos apropiados incluyendo una interpretación de una curva de respuesta de dosis.

FISH CONTAMINATED
DO NOT EAT



6.1 Riesgo y la ingeniería

Durante los últimos 60 años del siglo XX, la producción química mundial se incrementó varios cientos de veces, así es que para el comienzo del siglo XXI, alrededor de 70 000 químicos se venden por lo común en el comercio. Adicionalmente, cientos de nuevos químicos se introducen en el mercado cada año. Los individuos pueden estar expuestos a estos químicos en casa, en la escuela, en el lugar de trabajo, mientras viajan o simplemente mientras hacen ejercicio en una gran área urbana. El medio ambiente de interiores también se está convirtiendo en un lugar importante de exposición a químicos, debido a que los estadounidenses pasan ahora 85% de su tiempo en interiores. Por lo tanto, el medio ambiente de interiores, en particular aquellos que están pobremente ventilados y tienen alfombras, revestimientos y adhesivos que emiten químicos, pueden tener un gran impacto en la salud humana.

El **riesgo** es la probabilidad de daño, enfermedad o muerte. En términos generales,

$$\text{Riesgo} = f(\text{riesgo}, \text{exposición}) \quad (6.1)$$

El **riesgo ambiental** es el riesgo resultante de la exposición a un peligro ambiental potencial. Los peligros ambientales pueden ser químicos específicos o mezclas químicas como el humo del tabaquismo pasivo y el del escape de automóviles. También puede haber otros peligros como gérmenes patógenos, el agotamiento del ozono estratosférico, el cambio climático y la escasez de agua. Este capítulo se enfocará en los riesgos ambientales a los seres humanos derivados de la exposición a sustancias o químicos. Sin embargo, el concepto de riesgo ambiental puede aplicarse a la salud de las plantas, animales y ecosistemas enteros, que son la base de la existencia humana y mejoran su calidad de vida.

La tabla 6.1 resume muchas clases de peligros, incluyendo peligros físicos, peligros toxicológicos y peligros mundiales. Es importante notar que el adjetivo *peligroso* no sólo implica causa de cáncer, también incluye cualquier impacto adverso en los seres humanos o en el medio ambiente como resultado de la exposición a un químico o material.

El riesgo de un químico puede involucrar sus efectos tóxicos o el peligro que éste representa para los trabajadores o para una comunidad, por ejemplo, al causar una explosión. El riesgo se ha manejado históricamente mediante el direccionamiento del elemento de **exposición**. Por ejemplo, la exposición puede ser limitada al requerir a los trabajadores el uso de ropa protectora o al desarrollar letreros de advertencia para los camiones que transportan químicos peligrosos.

Debido a que el riesgo es el producto de una función de peligro y de exposición, se hacen claras dos implicaciones. A medida que el peligro se acerca al infinito, el riesgo sólo puede reducirse a casi cero al reducir la exposición a casi cero. A la inversa, a medida que el peligro se acerca a cero, la exposición puede acercarse al infinito sin afectar significativamente el riesgo. La química y la ingeniería verdes son métodos para reducir el peligro a cero.

Estas relaciones entre el riesgo, el peligro y la exposición son en extremo importantes debido a que los métodos actuales para proteger la salud humana y el medio ambiente están estrechamente ligados con el paradigma de riesgo y dependen casi en exclusiva en el control de la exposición. Los esfuerzos de ingeniería resultantes para reducir la probabilidad de exposi-

Tabla / 6.1

Categorías de peligros y ejemplos de manifestaciones potenciales de peligro			
Peligros de toxicidad humana	Peligros de toxicidad ambiental	Peligros físicos	Peligros mundiales
Carcinogenicidad	Toxicidad acuática	Explosividad	Lluvia ácida
Neurotoxicidad	Toxicidad aviar	Corrosividad	Calentamiento global
Hepatotoxicidad	Toxicidad anfibia	Oxidantes	Agotamiento del ozono
Nefrotoxicidad	Fitotoxicidad	Reductores	Amenaza de seguridad
Cardiotoxicidad	Toxicidad mamífera (no humana)	pH (ácido o básico)	Eventos de clima extremo como inundaciones
Toxicidad pulmonar		Reacción violenta con el agua	Escasez de agua
Toxicidad hematológica			Pérdida de biodiversidad
Toxicidad endocrina			Persistencia
Inmunotoxicidad			Bioacumulación
Toxicidad reproductiva			
Teratogenicidad			
Mutagenicidad (toxicidad del ADN)			
Toxicidad dérmica			
Toxicidad ocular			
Interacciones de enzimas			

ción han sido relevantes para un amplio rango de peligros incluyendo venenos, sustancias reactivas, inflamables y explosivos. Sin embargo, esta estrategia es tremendamente cara. Lo peor de todo, tal medida puede y, como una función probable, fallar al final. Cuando los controles de la exposición fallan, el riesgo es entonces igual a una función de peligro (vea la ecuación 6.1). Esta relación expone la necesidad de diseñar moléculas, productos, procesos, comportamientos sociales y sistemas para que la salud y la seguridad no dependan de los controles o sistemas que pueden fallar o ser saboteados (ya sea intencional o accidentalmente); por el contrario, se pueda confiar en el uso de químicos y materiales benignos (mínimamente peligrosos).

Durante las etapas tempranas del diseño de un proceso de manufactura, existe una gran cantidad de flexibilidad en el desarrollo de soluciones que previenen o minimizan el riesgo al tomar decisiones que eliminan el uso y la producción de químicos peligrosos. Un ingeniero no diseñaría intencionalmente un proceso de manufactura si el resultado directo fuera que el proceso provocaría que los trabajadores de la planta y los miembros de la comunidad contrajeran cáncer o que los peces de un río local se murieran después de la exposición a la descarga de agua de desperdicio. Tristemente,



Discusión en clase

¿El método actual para el manejo de riesgos mediante la reducción de la exposición parece ser un método particularmente proactivo o innovador? ¿No sería mejor un método que elimine o al menos reduzca el peligro? Observe que en la ecuación 6.1 y la definición del medio ambiente que le sigue, existe cero riesgo si hay cero exposición, lo cual es difícil de lograr en forma consistente y constante.

ejemplo/6.1 Limitaciones para controlar la exposición

Describe un evento pasado o actual en los que la falla de un sistema controlado mediante ingeniería permitió la exposición de seres humanos y del medio ambiente a liberaciones peligrosas.

respuesta

Hay muchas respuestas posibles. Un ejemplo sucedió en las primeras horas del día 3 de diciembre de 1984, cuando un tanque de retención que contenía 43 toneladas de isocianato de metilo (MIC) almacenado de una fábrica de Union Carbide en Bhopal, India, se sobrecalentó y liberó una mezcla de gas MIC tóxica, más pesada que el aire. El MIC es un químico extremadamente reactivo y se utiliza en la producción del insecticida carbaryl.

El análisis post-accidental del proceso mostró que el accidente comenzó cuando un tanque que contenía MIC tuvo una filtración. Se presume que la razón científica para el accidente fue que el agua entró al tanque en donde estaban almacenados alrededor de 40 m³ de MIC. Cuando se mezclaron el agua y el MIC, comenzó una reacción química exotérmica, produciendo mucho calor. Como resultado, la válvula de seguridad del tanque explotó por el incremento en la presión. Esta reacción fue tan violenta que el recubrimiento de concreto alrededor del tanque también se rompió. Se presume que se liberaron entre 20 y 30 toneladas de MIC durante la hora que tuvo lugar la filtración.

El gas se filtró a través de una chimenea de 30 m de altura, y esta altura no fue suficiente para reducir los efectos de la descarga. La razón fue que el alto contenido de humedad (aerosol) en la descarga se evaporó y dio lugar a un gas pesado que rápidamente se hundió en la tierra, en donde la gente tenía su lugar de residencia. De acuerdo con la Corte Médica de Bhopal, alrededor de 500 000 personas estuvieron expuestas. Se cree que alrededor de 20 000 murieron en consecuencia; en promedio, aproximadamente una persona muere cada día debido a los efectos. Más de 120 000 continúan sufriendo los efectos, incluyendo dificultades para respirar, cáncer, defectos de nacimiento serios, ceguera y otros problemas.

estos impactos adversos en los seres humanos y el ecosistema son el resultado de muchas de las prácticas actuales del diseño de ingeniería. Sin embargo, los ingenieros ahora están apoyando la "química verde" y la "ingeniería verde" como los medios para desarrollar químicos, materiales, procesos y servicios que reducen o eliminan el uso y la generación de sustancias peligrosas, llevando así al riesgo reducido para la salud humana y al medio ambiente al reducir el peligro.

Tome ahora los edificios como ejemplo. Reflexione por unos minutos sobre la gran variedad de materiales utilizados en la construcción de edificios, la gran lista de materiales y recubrimientos utilizados para decorar y amueblar un edificio, y el gran número de químicos utilizados durante la operación y el mantenimiento del edificio. ¿Cuántos de estos materiales estructurales, adhesivos, selladores, recubrimientos de piso y paredes, componentes de muebles y agentes de limpieza se seleccionan con base en el criterio para maximizar la salud y productividad de los habitantes del

Tabla / 6.2

Beneficios económicos (en dólares) estimados para la sociedad estadounidense si los arquitectos y los ingenieros diseñan y operan edificios teniendo en consideración la salud

De \$6 mil millones a \$14 mil millones de la reducción de enfermedades respiratorias

De \$1 mil millones a \$4 mil millones de la reducción de alergias y asma

De \$10 mil millones a \$30 mil millones de la reducción del síndrome del edificio enfermo

De \$20 mil millones a \$160 mil millones del incremento en la productividad del trabajador no relacionada con la salud.

SOURCE: Fisk (2000).

edificio al minimizar el impacto potencial adverso (el riesgo) para los seres humanos o el medio ambiente? Desafortunadamente, la respuesta a esta pregunta es “muy pocos”. El diseño verde de edificios toma en consideración la salud de los ocupantes del edificio junto con el impacto en el medio ambiente asociado con las opciones de material.

Ambientes de interiores pobremente diseñados y manejados tienen un gran impacto económico adverso en la sociedad que se asocia con los incrementos en los costos de salud y una productividad del trabajador más baja. Como se muestra en la tabla 6.2, se obtendrían enormes ahorros de la reducción que impacta a Estados Unidos. En los países en desarrollo con alta mortalidad, la contaminación del aire interior ahora es responsable de hasta 3.7% de la carga de enfermedad. Recuerde del capítulo 1 que 33% del riesgo ambiental que lleva a la pérdida de días por incapacidad en el mundo se debe a la contaminación del aire de interiores por combustibles sólidos quemados.

6.2 Percepción de riesgo

La **percepción de riesgo** examina los juicios que la gente hace cuando se les solicita caracterizar y evaluar actividades y tecnologías peligrosas. La gente hace juicios cualitativos o cuantitativos sobre el grado de riesgo actual y el deseo de muchos peligros diferentes a través de las opciones y comportamientos de cada día. Estas decisiones se basan en la probabilidad de un daño por un peligro específico y la severidad de las consecuencias asociadas con dicho daño.

Los juicios sobre riesgos se basan en diversas consideraciones. Un factor importante es qué tan familiarizado se está con el peligro. Si se cree que se sabe mucho sobre un peligro debido a que se está con frecuencia expuesto a éste, en general se sobreestima el grado de riesgo. Otro factor es si se está o no interactuando voluntariamente con un peligro. Cuando una persona voluntariamente toma un riesgo, es usual que sobreestime las posibilidades de un daño resultante. Esto tiene que ver con cuánto control los individuos creen tener sobre la situación. Los ejemplos de riesgo voluntario incluyen fumar, manejar un auto más rápido que el límite de velocidad y participar en actividades extremas como montañismo o paracaidismo. También, los individuos sienten con frecuencia que es más aceptable escoger un riesgo que ser puesto en riesgo por el gobierno o la industria.



© Skip O'Donnell/iStockphoto.



Percepción de riesgo



iStockphoto.

Identificar instalaciones del TRI mediante código postal

<http://www.scorecard.org/>

Inventario de liberación de tóxicos

<http://www.epa.gov/tri>

Esta actitud hacia el riesgo involuntario versus el voluntario explica por qué generalmente hay un tumulto público cuando una fábrica contamina el agua potable local o cuando la calidad del aire de interiores no es segura. En estos casos, el riesgo añadido de la exposición a agua y aire contaminados no es voluntario. Los individuos sienten que están siendo sujetos a peligros más allá de su control y sin su conocimiento. Ejemplos de riesgo involuntario son la inhalación pasiva de humo de cigarro, tener vías o líneas de poder de alto voltaje situadas en la comunidad y tener residuos de pesticida en el exterior de los productos alimenticios.

6.3 Residuos peligrosos y químicos tóxicos

La exposición a un químico tóxico o peligroso puede provocar la muerte, enfermedades u otros impactos adversos como defectos de nacimiento, infertilidad, crecimiento atrofiado o un desorden neurológico. Para los seres humanos, este contacto con un químico es típicamente a través de la ingestión, inhalación o contacto con la piel. La exposición al químico se puede asociar con beber agua, comer alimentos, ingerir tierra y polvo, inhalar contaminantes en el aire que pueden estar en forma de vapor o de partículas y el contacto con químicos que son transportados a través de la piel.

El **Inventario de Liberación de Tóxicos (TRI)** proporciona información al público acerca de residuos peligrosos y químicos tóxicos. Este inventario fue establecido por la **ley de planeación contra emergencias y derecho de la ciudadanía a la información (EPCRA)** de 1986 y se amplió en la Ley de prevención de la contaminación de 1990. El TRI es una base de datos abierta al público, publicada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), que contiene información sobre liberaciones de casi 650 químicos y categorías químicas, proporcionada por más de 23 000 instalaciones industriales y federales. El TRI rastrea la eliminación u otras liberaciones de ambas, tanto en sitio como fuera de sitio, incluyendo los desperdicios directos al aire, la tierra, la superficie del agua y el agua subterránea. También proporciona información sobre otras estrategias de manejo de desperdicios como el reciclaje, recuperación de energía, tratamiento y descargas a plantas de tratamiento de aguas residuales.

La base de datos del TRI puede buscarse por año, ubicación geográfica, químicos liberados o tipo de industria. Los ciudadanos y el personal de respuesta de emergencia pueden buscar emisiones de químicos tóxicos en sus comunidades. El TRI proporciona al público accesos sin precedentes a información acerca de liberaciones de químicos tóxicos y otras actividades de manejo de desperdicios a nivel local, estatal, regional y nacional. Una de las metas del TRI es el de darle poder a los ciudadanos estadounidenses, mediante la información, para que las compañías y los gobiernos locales estén al tanto de cómo se manejan los químicos tóxicos.

La figura 6.1 muestra la masa total de emisiones del TRI desde 1988, junto con el número de instalaciones que reportan liberaciones. Los datos del TRI ayudan al público, a los funcionarios del gobierno y a la industria a cumplir tres objetivos: 1) identificar las preocupaciones potenciales y tener un mejor entendimiento de los riesgos potenciales; 2) identificar las prioridades y las oportunidades para trabajar con la industria y el gobierno para reducir el desecho de químicos tóxicos u otras liberaciones y los riesgos potenciales asociados con los mismos y, 3) establecer objetivos de reducción y medir el progreso hacia las metas de reducción.

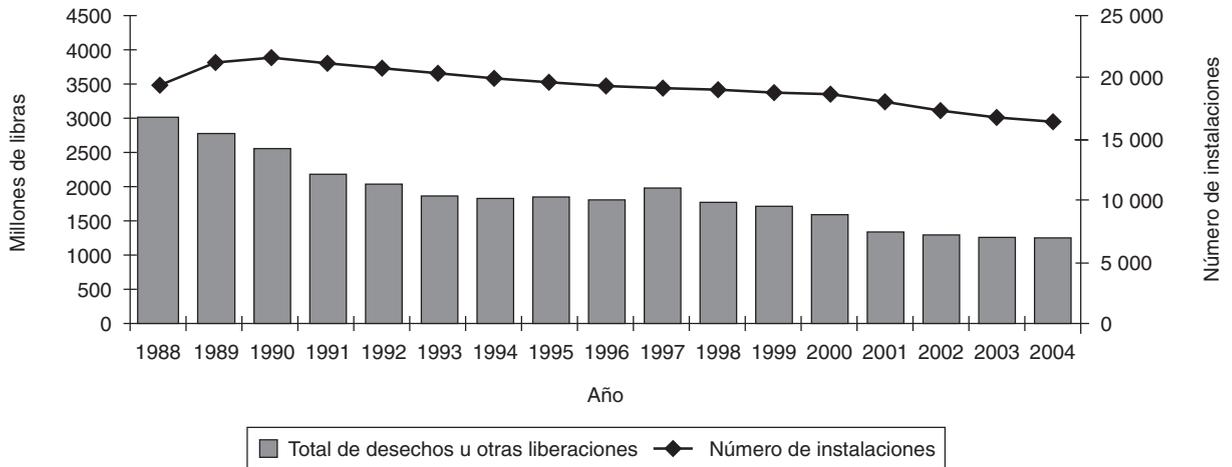


Figura 6.1 Emisiones del Inventario de Liberación de Tóxicos (TRI) (en millones de libras) desde 1988 y número de instalaciones que reportan emisiones

Adaptado de www.epa.gov/tri.

6.3.1 RESIDUOS PELIGROSOS

En Estados Unidos, un **residuo peligroso** es un subconjunto de un desperdicio sólido. Los desperdicios sólidos se definen según la **Ley sobre conservación y recuperación de recursos (RCRA)**. Esta definición regulatoria no dice nada acerca del estado físico del desperdicio, así es que algunos desperdicios sólidos se encuentran en forma líquida. En Estados Unidos, los **desperdicios sólidos** están legalmente definidos como cualquier material descartado no excluido por el 40 C.F.R. 261.4(a). Los *desperdicios excluidos* incluyen elementos como las aguas residuales domésticas, los residuos domésticos peligrosos, cenizas volantes y cenizas de fondo de la combustión del carbón y el abono que regresa al suelo. C.F.R. son las siglas en inglés del Código de Reglamentos Federales, documento en el que se publican los reglamentos federales. El número 40 indica la sección del C.F.R. relacionada con el medio ambiente. El C.F.R. se puede acceder vía Internet.

De tal manera, un desperdicio peligroso denota un desperdicio regulado. Sólo ciertas corrientes de desperdicio son designadas como peligrosas según los reglamentos federales. Los desperdicios se clasifican como peligrosos con base en: 1) características físicas como reactividad, corrosividad e inflamabilidad, 2) toxicidad, 3) cantidad generada y, 4) la historia del químico en términos de daños ambientales causados y el probable destino ambiental. Los residuos peligrosos pueden o no mostrar toxicidad.

6.3.2 TOXICIDAD

La toxicología ambiental, también conocida como ciencias de la salud ambiental, es un campo interdisciplinario que lidia con los efectos de los químicos sobre organismos vivientes. Debido a que la energía y el material se distribuyen y hacen ciclos a través de las cadenas alimenticias, es probable que un impacto en un nivel se refleje también en otros niveles. Por ejemplo, existe evidencia de que los niveles elevados de PCB en un pescado resultan en

Acceso al código de reglamentos federales

<http://www.gpoaccess.gov/cfr/>

Escombros de construcción y demolición

<http://www.epa.gov/epawaste/conserve/rrr/imr/cdm/index.htm>



Prueba de toxicidad

efectos adversos a la salud de niños nacidos de madres que incluían pescado en sus dietas. Mientras que la **bioacumulación** (concentración de un químico acumulada en un organismo a lo largo del tiempo) de los PCB puede no tener efecto adverso directo en peces adultos, hubo un impacto en ciertos peces de descendencia y en el siguiente nivel trófico (seres humanos).

Los efectos tóxicos se dividen en dos tipos: **carcinógenos** y **no carcinógenos**. Un carcinógeno promueve o induce tumores (cáncer), que es el crecimiento incontrolado o anormal y la división de células. Los carcinógenos actúan atacando o alterando la estructura y la función del ADN dentro de una célula. Muchos carcinógenos parecen situarse en sitios específicos; es decir, un químico particular ataca un órgano específico. En adición, los carcinógenos se categorizan con base en si causan efectos directos o indirectos: los *carcinógenos primarios* inician directamente el cáncer; los *pro-carcinógenos* no son carcinógenos sino que se metabolizan para formar carcinógenos y, por lo tanto, inician el cáncer indirectamente; los *co-carcinógenos* no son carcinógenos pero mejoran la carcinogenicidad de otros químicos, y los *promotores* mejoran el crecimiento de las células cancerígenas.

Recuadro / 6.1 Cómo se desarrolla el cáncer

El cáncer se refiere a un grupo de enfermedades que involucran crecimiento de tejido maligno anormal. Las investigaciones han revelado que el desarrollo del cáncer involucra una serie compleja de pasos, y los carcinógenos pueden operar en un número de maneras distintas. A la larga, el cáncer resulta de una serie de defectos en los genes que controlan el crecimiento de las células, su división y diferenciación. Los defectos genéticos que llevan al cáncer pueden suceder debido a que un químico (u otro agente carcinogénico) daña en forma directa al ADN.

Alternativamente, un agente puede tener efectos indirectos que incrementan la probabilidad, o aceleran el comienzo del

cáncer sin interactuar directamente con el ADN. Por ejemplo, un agente puede interferir con los mecanismos de reparación del ADN, incrementando por lo tanto la probabilidad de que la división de una célula dará lugar a células con ADN dañado. Un agente puede también incrementar los rangos de las divisiones celulares, incrementando por lo tanto, el potencial para que se introduzcan errores genéticos al tiempo que las células replican su ADN en la preparación para la división.

(EPA, "Hoja de datos para los lineamientos de la evaluación de riesgo carcinógeno", marzo de 2005)

La clasificación de un químico sobre si es carcinógeno para los seres humanos requiere evidencia suficiente de si la exposición humana lleva a una incidencia significativamente más alta de cáncer. Tal evidencia en general es recolectada de los trabajadores en ambientes de trabajo en donde existe contacto prolongado con un químico. (A esto se le llama datos epidemiológicos.) Mientras que existen pocos carcinógenos humanos *conocidos* (por ejemplo, benceno, cloruro de vinilo, arsénico y cromo hexavalente), muchos químicos son carcinógenos humanos *probables* (por ejemplo, benzo(a)pireno, tetracloruro de carbono, cadmio y PCB) y cientos de químicos tienen *evidencia sugestiva* de que son carcinógenos. Como se comenta más adelante, los químicos son enlistados como **carcinógenos sospechosos** cuando la evidencia experimental indica riesgo de cáncer incrementado en los animales de prueba y hay información insuficiente disponible para mostrar una relación directa de causa y efecto para los seres humanos.

Los efectos no carcinógenos incluyen todas las respuestas toxicológicas que no sean carcinogénicas, de las cuales hay un sinnúmero de ejemplos: daño a los órganos (incluyendo riñones e hígado), daño neurológico, inmunidad supresora y efectos de nacimiento y de desarrollo (daño en la habilidad

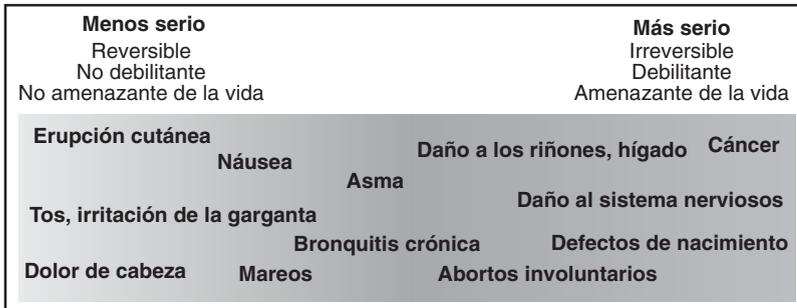


Figura 6.2 Continuidad de los riesgos a la salud debido a la exposición a no carcinógenos con rango desde menos serio a más serio

o inteligencia reproductiva de un organismo). Por ejemplo, los niveles de plomo elevados en los niños han demostrado provocar dificultades del aprendizaje y coeficientes intelectuales más bajos. Los efectos tóxicos que se manifiestan después de la exposición a químicos frecuentemente resultan de la interferencia con los sistemas de enzimas (catalizador) que median las reacciones bioquímicas críticas para la función del órgano. La figura 6.2 representa la continuidad de riesgos debido a la exposición a no carcinógenos como un rango de menos serio a más serio. Los riesgos que son reversibles, no debilitantes y/o que no amenazan la vida se consideran de menor preocupación que aquellos que son irreversibles, debilitantes y/o que amenazan la vida.

Los químicos colectivamente conocidos como **interruptores endocrinos** ejercen sus efectos al imitar o interferir con las acciones de las hormonas, los compuestos bioquímicos que controlan procesos fisiológicos básicos como crecimiento, metabolismo y reproducción. Los interruptores endocrinos pueden

Interruptores endocrinos

<http://www.setac.org/node/100>
<http://www.who.int/ipcs/assessment/en/>

Recuadro / 6.2 Químicos interruptores endocrinos

Los químicos interruptores endocrinos son químicos que, cuando se absorben en el cuerpo, imitan o bloquean las hormonas e interrumpen las funciones normales del cuerpo. Esta interrupción puede suceder mediante la alteración de los niveles normales de hormonas, la detención o la estimulación de la producción de hormonas, o al cambiar la manera en que las hormonas viajan a través del cuerpo, afectando así las funciones que estas hormonas controlan.

Estos químicos y sustancias se acumulan en el pescado y la vida salvaje, y el número de advertencias sobre la ingestión de pescado y vida salvaje debido a los interruptores endocrinos se ha incrementado y ha llegado a más de 30% de los lagos y 15% de las millas de ríos de Estados Unidos. Los estudios documentan que estos químicos se están acumulando en el pescado y la vida salvaje a niveles que están causando efectos hormonales y reproductivos serios en el pescado y la vida salvaje en la cima de la cadena alimentaria, incluyendo aves zancudas, caimanes, panteras de Florida, visones, osos polares, focas, ballenas beluga y orcas. Muchas subpoblaciones con exposición relevante están experimentando principalmente efectos reproductivos, resultando en infertilidad y fallas reproductivas.

En los seres humanos, diversos problemas de salud posiblemente vinculados con los químicos interruptores endocrinos se han registrado: 1) reduce el conteo de espermas en muchos países, 2) 55% de incremento en la incidencia de cáncer testicular de 1979 a 1991 en Inglaterra y Gales, 3) incrementos en el cáncer de próstata y, 4) incremento en el cáncer de mama en las mujeres, incluyendo un incremento anual de 1% en Estados Unidos desde los años 1940 (Amigos de la Tierra, 2009).

En la vida salvaje, los siguientes son ejemplos de efectos que se han vinculado con químicos interruptores endocrinos: 1) masculinización de algunos *Nucella lapillus* (una clase de caracol marino), 2) en pruebas de rutilos pequeños en varios ríos del Reino Unido se han encontrado huevos, 3) baja viabilidad de huevos, ovarios agrandados y tamaño de pene reducido en los caimanes de Florida y, 4) adelgazamiento de cascarones de huevo y apareamiento hembra-hembra en los pájaros (Amigos de la Tierra, 2009).

Los riesgos asociados con los químicos interruptores endocrinos apenas se empiezan a descubrir y cuantificar, debido a que las dosis que provocan los efectos son mucho más bajas que aquellas tradicionalmente probadas en los estudios de toxicidad.

Tabla / 6.3

Factores que afectan la toxicidad de un químico o un material

Actividad química de forma e innata.

Dosificación, especialmente relación dosis-tiempo.

Ruta de exposición.

Especies.

Capacidad para ser absorbido.

Metabolismo.

Distribución dentro del cuerpo.

Excreción.

Presencia de otros químicos.

ejercer efectos carcinógenos o no carcinógenos. Se cree que contribuyen al cáncer de mama en las mujeres y al cáncer de próstata en los hombres. Los químicos identificados como interruptores endocrinos incluyen pesticidas (como el DDT y sus metabolitos), químicos industriales (como algunos surfactantes y los PCB), algunos fármacos de prescripción y otros contaminantes como las dioxinas (National Science and Technology Council, Estados Unidos, 1996).

La probabilidad de una respuesta toxicológica se determina mediante la exposición a un químico (un factor en la ecuación 6.1): un producto de la dosis química y la duración sobre la cual dicha dosis es experimentada. En los seres humanos existen tres principales **vías de exposición**: ingestión (comer y/o beber), inhalación (respiración) y contacto dérmico (piel). La tabla 6.3 enlista factores importantes que afectan la toxicidad de un químico o un material.

Algunos químicos (por ejemplo, la dioxina) son letales para la prueba en animales en muy pequeñas dosis, en donde otros crean problemas a niveles mucho mayores. La tabla 6.4 enlista compuestos químicos con amplia

ejemplo/6.2 Toxicidad del cromo

¿Qué forma del cromo, Cr(III) o Cr(VI), es tóxica?

solución

La toxicidad del cromo varía grandemente dependiendo de en cuál estado oxidativo se encuentra. Cr(III) o Cr^{+3} es relativamente no tóxico, mientras que Cr(VI) o Cr^{+6} causa daños a la piel o nasal y cáncer de pulmón. Por supuesto, los químicos pueden someterse a reacciones de oxidación y reducción en condiciones ambientales, así es que la liberación de la forma menor de toxicidad no significa que el cromo no poseerá riesgo alguno para la salud humana o el medio ambiente.

Tabla / 6.4

Dosis oral letal mediana para diversos organismos y químicos

Químico	Organismo	LD ₅₀ (mg químico/kg peso corporal)
Metil etil cetona	Rata	5 500
Fluoranteno	Rata	2 000
Pireno	Rata	800
Pentaclorofenol	Ratón	117
Lindano	Ratón	86
Dieldrina	Ratón	38
Sarín (gas nervioso)	Rata	0.5

FUENTE: Valores de Patnaik, 1992. Reimpreso de Mihelcic, 1999, con permiso de John Wiley & Sons, Inc.

variación de toxicidades. Aquí, la **toxicidad** se define como causante de muerte, un punto final experimental que (para la prueba con animales) es más fácil determinarlo que, por ejemplo, el cáncer de pulmón.

Un método común para expresar la toxicidad es en términos de la **dosis letal mediana (LD₅₀)**, la cual es la dosis que resulta en la muerte de 50% de una población de organismos de prueba. La LD₅₀ se presenta típicamente como la masa de contaminante dosificada por masa (peso corporal) del organismo de prueba, utilizando unidades de mg/kg. Por lo tanto, un rodenticida con una LD₅₀ de 100 mg/kg resultaría en la muerte de 50% de una población de ratas, cada una pesando 0.1 kg, si se aplicara a una dosis de 10 mg por rata. Una dosis de 20 mg por rata de 0.1 kg resultaría en la muerte de más de 50% de la población, y una dosis de 5 mg por rata de 0.1 kg resultaría en la muerte de menos de 50 por ciento.

Un término similar, la **concentración letal mediana (LC₅₀)**, se utiliza típicamente en estudios de organismos acuáticos y representa la concentración de contaminante acuoso en el ambiente (opuesto a la dosis inyectada o ingerida) a la cual 50% de los organismos de prueba mueren.

Para identificar la LD₅₀ o la LC₅₀, una serie de experimentos a distintas concentraciones arroja una **curva de respuesta de dosis** como se ilustra en la figura 6.3. Cambios más sutiles (de comportamiento o de desarrollo) también reflejan una respuesta tóxica pero son difíciles de evaluar. Estos puntos finales no letales son medidos como una concentración efectiva que afecta a 50% de la población (EC₅₀).

Recuerde que lo que determina la toxicidad no es sólo la dosis, sino también la duración de la exposición a un químico o sustancia. La **toxicidad aguda** se refiere a la muerte (o alguna otra respuesta adversa) resultante de la exposición a corto plazo (horas a días) a un químico. La **toxicidad crónica** se refiere a una respuesta resultante de la exposición a largo plazo (semanas a años) a un químico.

Los efectos agudos son típicamente experimentados a concentraciones contaminantes más altas de los de efectos crónicos. Por ejemplo, la EPA ha

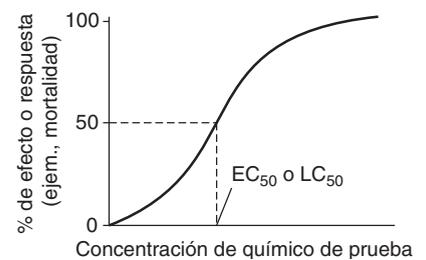


Figura 6.3 Forma típica de curva de respuesta de dosis utilizada en la identificación de EC₅₀ y LC₅₀ para químicos y organismos de prueba

Tabla / 6.5

Valores de LC₅₀ de 48 horas para 2,4-D para organismos seleccionados

Especie	LC ₅₀ (mg/L)
<i>Daphnia magna</i> (zooplancton)	25
<i>Pimephales promelas</i> (pez de agua dulce)	325
Trucha arcoiris	358

FUENTE: Patnaik, 1992.

Reporte del mercurio al Congreso

<http://www.epa.gov/mercury/reportover.htm>

establecido criterios de calidad de agua aguda (1.7 µg/L) y crónica (0.91 µg/L) para el mercurio (II) para proteger la vida acuática en los Grandes Lagos de los efectos tóxicos. Aquí, el criterio agudo es más alto que el valor crónico. A medida que la duración se incrementa, las concentraciones que pueden ser toleradas sin efecto adverso son más bajas. La toxicidad aguda del cobre para la trucha arcoiris ha demostrado que se reduce de una LC₅₀ de 0.39 mg/L a una duración de 12 horas, a 0.13 mg/L a 24 horas, a 0.08 mg/L a 96 horas. La toxicidad de un químico específico también varía según la especie. La tabla 6.5 demuestra este efecto, comparando los valores de LC₅₀ de 48 horas para el 2,4-ácido diclorofenoxiacético (2,4-D), un herbicida común utilizado en las granjas y céspedes caseros, para diversos organismos acuáticos.

Mientras que las concentraciones del 2,4-D enlistadas en la tabla 6.5 no tienen probabilidad de ser encontradas en aguas superficiales (aunque los niveles de químicos de agricultura en escorrentía se incrementan con las lluvias de primavera y el derretimiento de nieve), la variación observada en los valores de LC₅₀ sugiere un escenario en el que las poblaciones microcrustáceas de sedimentos vivientes serían afectadas mientras que las poblaciones de peces no. Tal escenario podría alterar e irrumpir potencialmente la cadena alimentaria con grandes impactos en el ecosistema. Un entendimiento de la función de la cadena alimentaria y la bioacumulación y toxicidad de contaminantes (en cada nivel trófico) es necesario para evaluar adecuadamente el riesgo que plantean los contaminantes químicos miriádos introducidos en nuestro medioambiente (vea el capítulo 5).

La naturaleza específica de la toxicidad de las especies presenta un defecto fundamental en los procedimientos comúnmente aplicados para calcular los efectos en los seres humanos con base en experimentos con animales de prueba. Los seres humanos pueden ser sustancialmente más o menos susceptibles a los efectos tóxicos de un compuesto específico a una dosis determinada de lo que son los organismos sustitutos de laboratorio. Cuando se utilizan estudios animales para determinar estándares para exposición humana, las incertidumbres involucradas en la utilización de los resultados son contabilizados a través del uso de supuestos conservativos y aplicaciones de factores de seguridad que pueden resultar en un estimado que es conservativo mediante diversas órdenes de magnitud, una teoría basada en la filosofía "mejor seguro que lamentarlo". En adición, el hecho de que alguna especie salvaje pueda ser más sensible a químicos tóxicos que los seres humanos, ha llevado a la promulgación del criterio de la calidad del agua en la que los estándares más rigurosos basados en la vida salvaje o en la salud humana regulan los límites de descargas. Por ejemplo, el nivel máximo de contaminantes (MCL) de cromo permitido para el agua potable es de 0.1 mg/L, mientras que el criterio agudo para la vida acuática de agua dulce es de 21 µg/L. En este caso, el estándar de la vida salvaje es de aproximadamente una quinta parte del valor basado en la salud humana.

Los segmentos sensibles de una población, conocidos como **poblaciones susceptibles**, deben recibir distinta consideración al determinar los efectos tóxicos de los químicos o sustancias. Los segmentos embrionarios, juveniles, ancianos y/o enfermos de cualquier población (humana o ambiental) son propensos a ser más susceptibles a los efectos adversos de la exposición química de lo que son los adultos jóvenes saludables. En algunos casos, el sexo de un individuo también puede influir en su susceptibilidad.

La *toxicidad sinérgica* resultante de la exposición a múltiples químicos, es un fenómeno que está recibiendo atención en aumento. Por ejemplo, considere dos compuestos con valores LC₅₀ de 5 y 20 mg/L, respectivamente. Cuando se

Tabla / 6.6

Toxicidad combinada potencial resultante de la exposición a una mezcla de químicos A y B

Tipo de interacción	Efecto tóxico, químico A	Efecto tóxico, químico B	Efecto combinado, químicos A + B
Aditividad	20%	30%	50%
Antagonismo	20%	30%	5%
Potenciación	0%	20%	50%
Sinergismo	5%	10%	100%

presentan juntos, sus valores individuales de LC_{50} pueden caer a 3 y 10 mg/L, niveles que son más bajos que los valores individuales LC_{50} . En algunos casos, los químicos pueden tener el efecto opuesto (antagónico), resultando en una combinación que es menos tóxica que cuando se presenta por separado.

La tabla 6.6 proporciona un ejemplo de los posibles efectos que las mezclas químicas tendrían en toxicidad combinada. Advierta que los efectos combinados de los dos químicos (A y B) pueden ser mayores o menores. Éste es un ejemplo de la dificultad en la evaluación de los riesgos de las mezclas químicas. Desafortunadamente, los estudios científicos de los efectos sinérgicos crónicos son escasos, en gran parte porque existe un sinnúmero de químicos y combinaciones de químicos y porque los experimentos de largo plazo involucran dificultades inherentes.

6.4 Ética y riesgo de la ingeniería

Los ingenieros deben entender los riesgos ambientales para poder proteger a todos los segmentos de la sociedad y a todos los habitantes de los ecosistemas. Estos individuos incluyen a los residentes de comunidades en las que reside la ingeniería, la vida acuática que habita en un río corriente abajo de un sitio de construcción o planta de tratamiento y a la comunidad mundial de más de 6 mil millones de personas.

Con mucha frecuencia, los ingenieros trabajan para minimizar o eliminar el riesgo de un miembro *promedio* de la sociedad o un habitante de un ecosistema que es valorado por su deporte recreacional o su beneficio comercial. Dadas las limitaciones de la evaluación de riesgos y la multitud de incertidumbres, los ingenieros necesitan considerar cuidadosamente todos los segmentos de la sociedad así como la salud del ecosistema (por ejemplo, la biodiversidad y las especies en peligro). También es importante reconocer los segmentos susceptibles de cualquier población que puedan ser significativamente más sensibles a la exposición ambiental de un químico o sustancia. Por ejemplo, el impacto de un químico variará según edad, género, estado de salud, ocupación y estilo de vida de una persona.

En el fenómeno de la **justicia ambiental**, ciertos segmentos de la sociedad que se encuentran en desventaja socioeconómica pueden cargar con una mayor cantidad de riesgo ambiental. Un elemento de justicia ambiental

Carga mundial de morbilidad

http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/en/

Justicia ambiental

<http://www.epa.gov/compliance/environmentaljustice/>

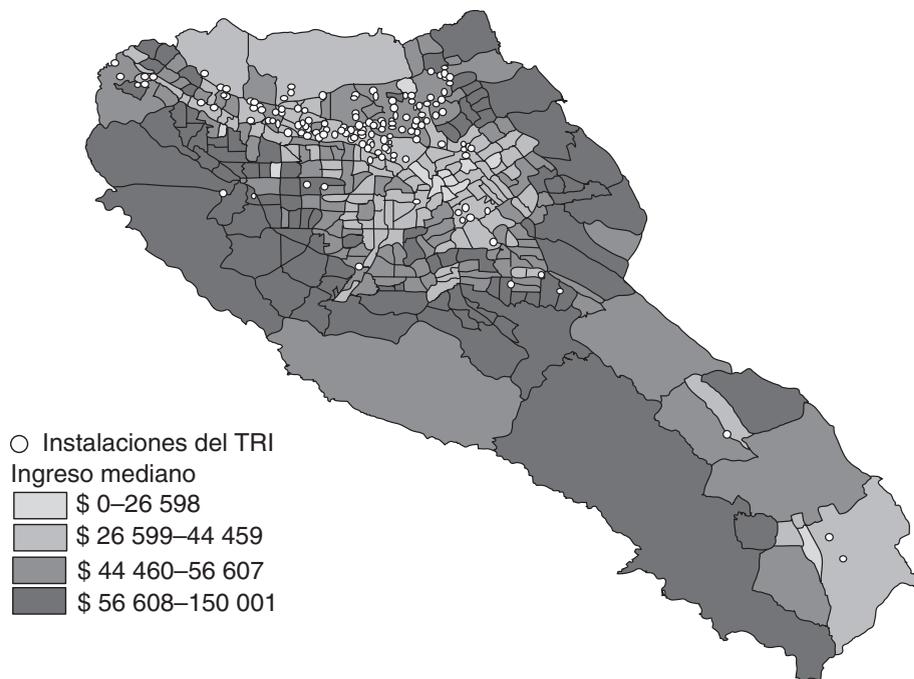


Figura 6.4 Instalaciones requeridas para enlistar sus emisiones tóxicas en el TRI, por ingreso mediano Advierta que las instalaciones que emiten químicos tóxicos están ubicadas principalmente en las áreas con ingresos medianos menores.

Meuser y Szacz, *American Behavioral Scientist* 43 (4), p. 602, derechos reservados © 2000. Reimpreso con autorización de SAGE Publications, Inc.

Indigentes y medio ambiente

<http://www.unep.org/indigenous>



Discusión en clase

Los individuos en desventaja económica también podrían estar viviendo en una ubicación en el mundo en desarrollo en donde están expuestos a agentes patógenos causantes de enfermedades en agua potable contaminada y ostentar la carga añadida de impacto de gran escala del sida y de los efectos crónicos de la malaria. El cambio climático que deshiela el hielo del Ártico está molestando la subsistencia de estilos de vida del pueblo Inuit, que vive en las regiones árticas, así como a los osos polares que se cazan en estas áreas. ¿Es justo que un riesgo mayor sea asumido por estos segmentos de la comunidad mundial?

es aparente en el Condado de Santa Clara, California, en donde las instalaciones que se requieren para enlistar sus emisiones tóxicas en el Inventario de Liberación de Tóxicos de la EPA se encuentran ubicadas en comunidades con ingresos medianos menores (figura 6.4). La gente en desventaja económica suele habitar lugares que los expone a un mayor número de concentraciones más altas de químicos tóxicos (por ejemplo, junto a carreteras que contribuyen a los contaminantes del aire, junto a las industrias que emiten químicos de preocupación, a favor del viento de los incineradores); vive en edificios que tienen materiales peligrosos asociados con construcciones más viejas o que tienen envejecimiento de su infraestructura; o tienen empleos con exposición elevada a materiales peligrosos.

Estos individuos de mayor riesgo viven en áreas rurales o urbanas, teniendo por lo general poca influencia política y con frecuencia son miembros de grupos minoritarios en desventaja económica. Podrían ser segmentos de una población que tiene niveles de exposición elevados debido a sus hábitos de cacería o pesca debido a un estilo de vida más subsistente (como es el caso de los nativos americanos quienes comen más pescado o partes del pescado que contienen mayores concentraciones de tóxicos que en la dieta estadounidense promedio). Incluyen a las comunidades afroamericanas ubicadas cerca del intenso número de instalaciones de procesamiento de petróleo y químicos ubicadas a lo largo de la parte baja del Río Mississippi.

Recuadro / 6.3 Justicia ambiental y derechos humanos



John Muir en el Río Merced con los Arcos Reales y la Columna de Washington al fondo, en el Parque Nacional de Yosemite, California. John Muir Papers, Holt-Atherton Special Collections, University of the Pacific Library. Derechos Reservados 1984 Muir-Hanna Trust.

John Muir, fundador del Sierra Club, dijo, “Todos necesitan la belleza tanto como el pan, lugares en donde jugar y en donde rezar, en donde la naturaleza puede sanar y dar fuerza al cuerpo y al alma por igual”.

La EPA define la justicia ambiental como el “tratamiento justo y participación significativa de toda la gente sin importar raza, color, origen nacional o ingresos con respecto al desarrollo, implementación y ejecución de leyes, reglamentos y políticas ambientales”.



<http://www.who.int/en/>

La constitución de la Organización Mundial de la Salud (escrita por primera vez en 1946) dice: “El disfrute del estándar de salud más alto alcanzable es uno de los derechos fundamentales de todo ser humano”. En 2002, el agua fue reconocida como un derecho básico cuando el Comité de las Naciones Unidas para los Derechos Económicos, Sociales y Culturales acordó: “El derecho al agua claramente cae dentro de la categorías de garantías esenciales para asegurar un estándar de vida adecuado, particularmente debido a que es una de las más fundamentales condiciones para la supervivencia”.

Los ingenieros tienen la responsabilidad de considerar a estos individuos en riesgo y a las comunidades que habitan y de minimizar, o eliminar, la probabilidad de que ostenten una mayor proporción de riesgo ambiental que los segmentos de la sociedad más saludables, mejor educados o políticamente más poderosos. Con el nuevo y creciente conocimiento de diseño sustentable e ingeniería verde, se tiene la capacidad de lograr estos retos al continuar mejorando la calidad de vida para *todos* los segmentos de la sociedad en el mundo en desarrollo y en el desarrollado al emplear algunos químicos y materiales benignos, reduciendo el consumo de energía y material, y tomando una perspectiva del sistema.

6.5 Evaluación de riesgo

Las evaluaciones del riesgo crean preguntas como éstas: ¿Qué problemas de salud son causados por químicos y sustancias liberadas en el hogar, lugar de trabajo y medio ambiente? ¿Cuál es la probabilidad de que los seres humanos logren experimentar un efecto de salud adverso cuando son expuestos a concentraciones específicas de químicos? ¿Qué tan severa sería la respuesta adversa? Lo que resta de este capítulo se enfoca principalmente en cómo cuantificar los riesgos asociados con la exposición a químicos y otros agentes ambientales y los impactos subsecuentes en la salud humana.

Los cuatro componentes de una **evaluación de riesgo** completa son: 1) evaluación del peligro, 2) evaluación de la dosis-respuesta, 3) evaluación de la exposición y, 4) caracterización del riesgo. La figura 6.5 ilustra cómo estos cuatro elementos se integran. Una evaluación de riesgo organiza y analiza un gran conjunto de información incrustada en los cuatro compo-

Evaluación de riesgo

<http://www.epa.gov/risk/>



Discusión en clase

Las tres declaraciones provistas en el recuadro 6.3 sugieren que los seres humanos necesitan lugares silvestres, los que se encuentran en desventaja económica no deberían ser obligados con un porcentaje desproporcionado de riesgo ambiental, y acceder a un nivel básico de agua dulce y saneamiento, un lugar de trabajo saludable, y un medio ambiente saludable y derechos legales, en lugar de comodidades o servicios que deberían ser marginados o privatizados. ¿Está de acuerdo con estas tres declaraciones? ¿A toda la gente en el mundo debería garantizársele algún acceso básico al agua que garantizaría algún nivel específico de salud? ¿Qué hay acerca de los ecosistemas?

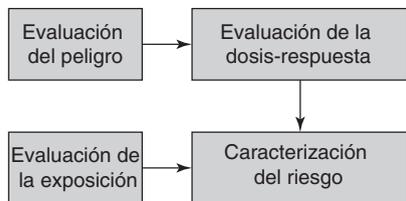


Figura 6.5 Componentes de una evaluación del riesgo completa Las evaluaciones de la respuesta a la dosis y a la exposición se combinan para arrojar una caracterización del riesgo.

Para determinar si algún peligro ambiental resultará en un impacto adverso en los seres humanos o en el medioambiente. El peligro ambiental podría ser la exposición a un químico específico o a un elemento más amplio tal como el cambio climático.

6.5.1 EVALUACIÓN DEL PELIGRO

Una evaluación del peligro no es una evaluación del riesgo. Una **evaluación del peligro** consiste en una revisión y análisis de datos de toxicidad, evidencia de peso de que una sustancia provoca varios efectos tóxicos y la evaluación de si los efectos tóxicos en un contexto ocurrirán también en otros contextos. La evaluación del peligro determina si un químico o una sustancia están o no vinculados con una preocupación particular de la salud, mientras que una evaluación del riesgo tomará en cuenta la evaluación del peligro, así como la evaluación de la exposición.

Las fuentes de datos de toxicidad incluyen los estudios de pruebas de ensayo, estudios de animales y estudios de seres humanos. Los estudios de prueba de ensayo son rápidos y relativamente fáciles, así es que se utilizan por lo común para cribar químicos. Los estudios de animales pueden medir efectos agudos o crónicos. Podrían investigar un punto final general (por ejemplo, la muerte) o un punto final más especializado (por decir, un defecto de nacimiento). Los estudios controlados de laboratorio se utilizan comúnmente para determinar la toxicidad de químicos específicos en la vida acuática. Los estudios de seres humanos típicamente consisten de estudios de casos que alertan a la sociedad sobre un problema y sobre estudios epidemiológicos controlados más extensos.

El mejor estudio para determinar el impacto en los seres humanos es el estudio epidemiológico. La **epidemiología** es el estudio de las enfermedades en las poblaciones de seres humanos o animales, específicamente cómo, cuándo y en dónde ocurren. Los epidemiólogos intentan determinar qué factores están asociados con las enfermedades (factores de riesgo) y qué factores pueden proteger a la gente o a los animales contra la enfermedad (factores protectores).

Recuadro / 6.4 Bases de datos toxicológicos humanos y de ecosistemas

Integrated Risk Information System (IRIS)

El Integrated Risk Information System (IRIS) es una base de datos electrónica que contiene información sobre el efecto de cientos de químicos en la salud humana (vea www.epa.gov/iris/). El IRIS proporciona información para dos componentes de una evaluación de riesgo: la evaluación del peligro y la evaluación de la dosis-respuesta. El IRIS fue desarrollado por la EPA y está escrito por profesionales involucrados en la evaluación del riesgo, la toma de decisiones y las actividades reguladoras. De esta manera, la información la pueden utilizar individuos que no tienen experiencia en toxicología.

El IRIS contiene información descriptiva y cuantitativa sobre la identificación del riesgo, factores de pendientes

orales, unidades de riesgo orales y de inhalación para efectos carcinógenos, así como dosis de referencia oral (RfDs) y concentraciones de inhalación de referencia (RfCs) para efectos crónicos no carcinógenos en la salud. Estos temas se comentan más adelante en este capítulo.

Ecotoxicología

La EPA mantiene la base de datos ECOTOX como una fuente para localizar datos de toxicidad de un solo químico en la vida acuática y las plantas terrestres y la vida silvestre (vea www.epa.gov/ecotox/). Esta base de datos se puede utilizar para apoyar las evaluaciones de peligro ecológico y para evaluar el daño potencial asociado con las aguas residuales efluentes y/o lixiviados.

Tabla / 6.7

Dificultades de los estudios epidemiológicos

Igualar a los grupos de control es difícil, debido a que los factores que llevan a la exposición a un químico pueden estar asociados con otros factores que afectan a la salud.

La sociedad se ha vuelto más móvil, así que puede ser que los individuos ya no vivan en la misma comunidad durante toda su vida.

Los certificados de muerte generalmente miden sólo la causa de la muerte, así es que pierden las condiciones de salud que los individuos tuvieron durante el curso de su vida.

Otros puntos finales de toxicidad además de la muerte (por ejemplo, abortos involuntarios, infertilidad, dificultades del aprendizaje) pueden no estar medidos con el uso de los certificados de muerte.

Los datos de exposición certeros pueden ser difíciles de obtener para un gran grupo de individuos.

Se requieren grandes poblaciones para estos estudios para que los análisis estadísticos rigurosos puedan aplicarse a los datos.

Muchas enfermedades pueden tomar años para desarrollarse.

Los estudios epidemiológicos se dividen en dos clases básicas dependiendo si los eventos ya han ocurrido (retrospectiva) o si los eventos pueden suceder en el futuro (prospectiva). Los estudios más comunes son los estudios retrospectivos a los cuales también se les llama estudios de control de caso. Un estudio de control de caso puede comenzar cuando se observa el brote de una enfermedad y sus causas no son conocidas, o cuando la enfermedad es poco común dentro de la población en estudio.

Sin embargo, estas clases de estudios tienen dificultades que se resumen en la tabla 6.7. Con los estudios epidemiológicos es extremadamente difícil probar la causalidad, esto significa probar que un factor de riesgo específico efectivamente causó la enfermedad que se está estudiando. La evidencia epidemiológica puede, sin embargo, fácilmente probar que este factor de riesgo está asociado (correlacionado) con un incidente mayor de enfermedad en la población expuesta a dicho factor de riesgo. Mientras más alta es la correlación, más certera es la asociación.

El **peso de la evidencia** es una breve narrativa que sugiere el potencial sobre si un químico o sustancia pueden actuar como carcinógenos para los seres humanos. En la actualidad, el peso de la evidencia está clasificado en uno de los cinco descriptores enlistados en la columna izquierda de la tabla 6.8. Los científicos que analizan los datos disponibles obtenidos de los estudios de animales o de seres humanos desarrollan estos descriptores para carcinógenos. La columna derecha de la tabla 6.8 resume cómo estos descriptores están relacionados con la calidad y la cantidad de datos disponibles. El IRIS (descrito en el recuadro 6.4) proporciona información sobre el descriptor asociado con químicos en particular.

6.5.2 EVALUACIÓN DE LA DOSIS-RESPUESTA

DOSIS Una **dosis** es la cantidad de un químico recibida por un sujeto que puede interactuar con el proceso metabólico del sujeto u otros receptores



Dosificación

Tabla / 6.8

Explicación de los descriptores del peso de la evidencia

Descriptor del peso de la evidencia	Relación del descriptor con la evidencia científica
Carcinógenos para seres humanos	Evidencia epidemiológica convincente demuestra la causalidad entre la exposición humana y el cáncer, o la evidencia demuestra excepcionalmente cuando existe evidencia epidemiológica fuerte, evidencia animal extensiva, conocimiento del modo de acción e información de que el modo de acción es anticipado para suceder en seres humanos y progresar en tumores.
Probabilidad de ser carcinógenos para seres humanos	Efectos de tumores y otros datos clave son adecuados para demostrar el potencial carcinógeno para los seres humanos pero no alcanzan el peso de la evidencia para ser carcinógenos para los seres humanos.
Evidencia sugestiva de potencial carcinógeno	Datos humanos o animales son sugestivos de ser carcinógenos, lo cual crea una preocupación sobre los efectos carcinogénicos pero no se juzga lo suficiente para una conclusión más fuerte.
Información inadecuada para evaluar el potencial carcinógeno	Datos que se juzgan como inadecuados para desempeñar una evaluación.
No es probable que sea carcinógeno para los seres humanos	Los datos disponibles se consideran robustos como para decidir que no existe base alguna para preocupación de peligro carcinógeno humano.

FUENTE: EPA, *Lineamientos para la evaluación de riesgo carcinógeno*, marzo 29, 2005.

biológicos después de que la dosis cruza una frontera exterior. Dependiendo del contexto, la dosis puede ser: 1) la cantidad de químico administrada al sujeto, 2) la cantidad administrada al sujeto que alcanza una ubicación específica en el organismo (por ejemplo, el hígado) o, 3) la cantidad disponible para la interacción dentro del organismo de prueba después de que el químico cruza una barrera como la pared del estómago o la piel.

Para calcular la dosis asociada con un químico, determine la masa del químico administrado por unidad de tiempo y divídalo entre el peso del individuo. En el caso de un adulto o niño que está bebiendo agua que contiene un químico en cuestión, la dosis puede determinarse como se muestra en el ejemplo 6.3.

ejemplo/6.3 Determinación de la dosis

Asuma que el químico en cuestión tiene una concentración de 10 mg/L en el agua potable, que los adultos beben 2 litros de agua por día y los niños beben 1 litro de agua por día. Asuma también que un hombre adulto pesa 70 kg, una mujer adulta pesa 50 kg y un niño pesa 10 kg. ¿Cuál es la dosis para cada uno de estos tres miembros de la sociedad?

solución

Para encontrar la dosis asociada con un químico, determine la masa del químico tomada por unidad de tiempo y divídalo entre el peso del

ejemplo/6.3 Continuación

individuo. En esta situación, la única ruta de exposición es al beber agua contaminada. La dosis para los tres segmentos de la sociedad puede ser determinada de la siguiente manera:

$$\text{Dosis de mujer adulta: } \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 2 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{50 \text{ kg}} = 0.40 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

$$\text{Dosis de hombre adulto: } \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 2 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{70 \text{ kg}} = 0.29 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

$$\text{Dosis de niño: } \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{10 \text{ kg}} = 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

Advierta que, en este ejemplo, la dosis recibida por el niño y la mujer adulta es más grande que la recibida por el hombre adulto. Esta es una razón por la que ciertos segmentos de la sociedad pueden estar en mayor riesgo cuando son expuestos a un químico específico. Otra razón es que, en la mayoría de las situaciones, los niños, los adultos mayores y los enfermos son dañados en mayor proporción por la exposición a químicos tóxicos y gérmenes patógenos que los adultos jóvenes y saludables. Lo mismo aplicaría para las plantas y los animales que habitan los ecosistemas.

Al determinar la dosis, los científicos pueden contar la absorción del químico. Por ejemplo, la pared estomacal puede actuar como una barrera para la absorción de algunos químicos que son ingeridos, mientras que la piel puede actuar como una barrera para los químicos que entran en contacto con las manos. Para contar con el hecho de que 100% de la toma (o absorción) de algunos químicos no sucede, multiplique la dosis por el porcentaje absorbido (denominado f en el ejemplo 6.4). El valor de f típicamente es de 0 a 0.1 (de 1 a 10 por ciento) para los metales y de 0 a 1.0 (de 0 a 100 por ciento) para muchos orgánicos.

En muchos estados de Estados Unidos, la eficiencia de absorción aplicable al contacto dérmico se considera que es de 10% ($f = 0.10$) en cuanto al contacto con químicos orgánicos volátiles o semivolátiles y de 1% ($f = 0.01$) para los químicos inorgánicos. En cuanto a la ingestión de tierra y polvo contaminados, se asume que es de 100% ($f = 1.0$) para químicos orgánicos volátiles y de 100% para los químicos absorbidos más fuertemente a la tierra (por ejemplo, los PCB y pesticidas). Sin embargo, el medio en el que el químico está presente (agua contra lípidos, aire contra agua) puede determinar la extensión de la absorción.

DOSIS-RESPUESTA En los estudios de animales de laboratorio, el daño a la salud típicamente se mide sobre un rango de dosis (mínimo tres). Debido a que las poblaciones de muestras son mantenidas bajas durante

ejemplo/6.4 Contabilidad de la eficiencia de absorción al determinar la dosis

Asuma que los científicos saben que sólo 10% del químico comentado en el ejemplo 6.3 es absorbido a través de la pared estomacal. En este caso, la exposición al químico fue únicamente a través de agua potable contaminada. ¿Cuál es la dosis para las tres poblaciones objetivo?

solución

Debido a que 10% del químico es transportado a través de la pared estomacal, $f = 0.10$. Las dosis que cuentan para el transporte incompleto del químico en cuestión para los tres segmentos de sociedad son las siguientes:

$$\text{Dosis de mujer adulta: } \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.10 \times 2 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{50 \text{ kg}} = 0.04 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

$$\text{Dosis de hombre adulto: } \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.10 \times 2 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{70 \text{ kg}} = 0.029 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

$$\text{Dosis de niño: } \frac{10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.10 \times 1 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{10 \text{ kg}} = 0.10 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

Aquí, la dosis es mucho más baja que cuando el efecto de absorción fue descuidado; sin embargo, los niños y las mujeres adultas aun reciben una dosis más grande que los hombres adultos.

estos estudios para ahorrar tiempo y dinero, las dosis aplicadas deben estar a concentraciones relativamente altas, esto es, a concentraciones más altas de las que se observan típicamente en el medio ambiente (por ejemplo, en el lugar de trabajo y en el hogar). Consecuentemente, una **evaluación de la dosis-respuesta** se lleva a cabo para permitir una extrapolación de los datos obtenidos de los estudios de laboratorio desarrollados para dosis más altas a dosis más bajas que son más representativos de la vida diaria. Debido a este proceso de extrapolación, la evaluación puede pasar por alto peligros como los efectos de interrupción endocrina, los cuales pueden suceder con dosis excesivamente bajas. Sin embargo, como se describe en esta sección, las evaluaciones de la respuesta a la dosis son llevadas a cabo de maneras diferentes para los carcinógenos y los no carcinógenos.

Carcinógenos Los científicos tienen conocimiento de los efectos carcinógenos de los químicos principalmente a través de estudios en pruebas de animales de laboratorio. Los estudios de laboratorio son manejados a dosis más altas para que los científicos puedan observar cambios estadísticos

como respuesta según la dosis. En este caso, la respuesta adversa es la formación de un tumor o algún otro signo de cáncer. Los carcinógenos son tratados como si tuvieran **efecto sin umbral**, lo cual es, según la suposición de que cualquier exposición a una sustancia causante de cáncer resultará, con un grado de incertidumbre, en la iniciación de un cáncer.

La figura 6.6 muestra un ejemplo de una evaluación de dosis-respuesta para un químico carcinógeno. Debido a que un acercamiento científico conservador se utiliza y, como se ha visto previamente, la evidencia sugiere que no existe ningún efecto umbral, la intersección de la curva dosis-respuesta a bajas dosis está entre la intersección del cero. La aplicación de tal modelo de la dosis-respuesta implica que la probabilidad de contraer cáncer es de cero, sólo si la exposición al carcinógeno es de cero. La pendiente de la curva dosis-respuesta a dosis muy bajas es llamada **factor de potencia** o **factor de pendiente**. El factor de pendiente es un estimado por arriba del límite del riesgo por el incremento de dosis que se puede utilizar para calcular las probabilidades de riesgo carcinógeno para diferentes niveles de exposición.

Como se muestra en la figura 6.6, el factor de pendiente tiene unidades de mg/kg por día inversas o $(\text{mg}/\text{kg por día})^{-1}$. Ésta iguala la unidad de riesgo para una toma diaria crónica de 1 mg/kg por día. Los valores del factor de pendiente para muchos químicos carcinógenos están disponibles en la base de datos del IRIS (vea el recuadro 6.4). Como verá después en diversos ejemplos, para obtener el riesgo general se multiplica el factor de pendiente por la dosis calculada.

Para la mayoría de las evaluaciones de riesgo se determina la dosis diaria promedio al asumir que un individuo está expuesto a la máxima concentración del carcinógeno durante toda su vida. En este caso, se asume que el individuo adulto vive 70 años y pesa 70 kg. Este tiempo promedio de 70 años puede ser diferente al tiempo real de exposición, como se comentará más adelante al reunir todo para realizar una asesoría de riesgo para determinar una limpieza basada en riesgo de nivel de contaminantes encontrados en el agua potable y la tierra.

No carcinógenos Los químicos no carcinógenos no inducen tumores. En este caso, el punto final adverso sería un impacto en la salud como enfermedad del hígado, dificultades del aprendizaje, pérdida de peso o infertilidad. Obviamente, muchos puntos finales no resultan en cáncer o en la muerte. Un punto importante que se debe entender es que, a diferencia de los carcinógenos, se asume que los no carcinógenos tienen un **efecto umbral**. Esto es, existe una **dosis límite** o **nivel límite** por debajo de la cual se cree que no existe un impacto adverso. La figura 6.7 muestra la evaluación de la dosis-respuesta para un no carcinógeno.

En la figura 6.7 se definen diversos términos nuevos. Primero, existe un **nivel de efecto adverso no observable (NOAEL)**. El NOAEL es la dosis (unidades de mg/kg por día) a la que no se observa ningún efecto de salud adverso. Una dosis menor o igual a este nivel se considera como segura. Sin embargo, debido a que existe incertidumbre en esta dosis segura de no carcinógenos, los científicos aplican dos factores de seguridad al NOAEL para determinar la **dosis de referencia (RfD)**.

La dosis de referencia está definida por la EPA como un estimado, con incertidumbre que abarca tal vez un orden de magnitud, una exposición oral diaria a la población humana (incluyendo subgrupos sensibles) que se encuentra probablemente sin un riesgo apreciable de efecto deletéreo durante una vida.

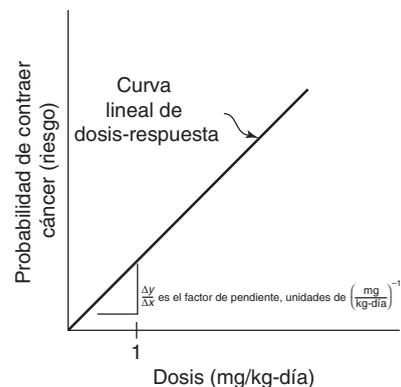


Figura 6.6 Relación lineal de dosis-respuesta para una sustancia o químico carcinógeno La intersección de cero indica que, de acuerdo con este modelo, no existe ningún efecto umbral, así es que la probabilidad de contraer cáncer es de cero sólo si la exposición a un carcinógeno es de cero. El eje y puede pensarse como la probabilidad de contraer cáncer a una dosis dada. El eje x es la dosis (mg de químico por kg de peso corporal por día). La pendiente de la curva dosis-respuesta cerca de la intersección para una dosis de 1 mg/kg por día es referida como el factor de potencia o factor de pendiente, con unidades de mg/kg por día inversas.

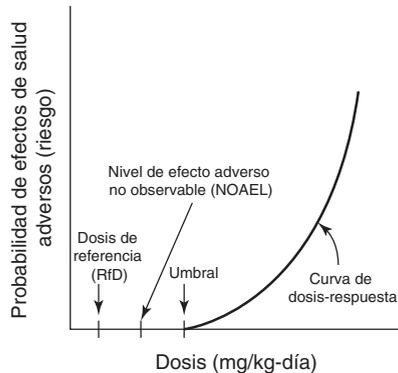


Figura 6.7 Relación de dosis-respuesta para un químico o sustancia no carcinógena Advierta la presencia de un umbral de dosis por debajo del cual no se observa respuesta adversa para la respuesta que está siendo evaluada. El eje y puede considerarse como la probabilidad de contraer un efecto adverso a una dosis determinada. El eje x es la dosis (mg de químico por kg de peso corporal por día). El NOAEL es la dosis a la cual no se observa efecto de salud adverso. Las dosis menores o iguales a este nivel pueden considerarse como seguras. La dosis de referencia (RfD) es un estimado de una dosis de vida que probablemente no tiene riesgo significativo. Las RfDs se utilizan para su ingestión oral a través de rutas de exposición como beber agua o ingerir alimentos.

La RfD se puede expresar matemáticamente:

$$RfD = \frac{NOAEL}{UF} \quad (6.2)$$

Advierta que la ecuación 6.2 y la figura 6.7 muestran que la DdR es más baja que el NOAEL. El **factor de incertidumbre (UF)** normalmente tiene un rango de 10 a 1 000. La aplicación del UF cuenta para diversas incertidumbres al aplicar los valores NOAEL para calcular los valores DdR. (Más adelante, el recuadro 6.6 comenta estas incertidumbres y cómo cuentan los valores UF para estas incertidumbres en la caracterización del riesgo.)

La inclusión del UF para determinar una dosis *segura* muestra que la dosis de referencia (unidades de mg/kg-día) fue desarrollada para contar para la incertidumbre asociada con la conducción de estudios de dosis-respuesta en pequeñas poblaciones de animales de prueba homogéneos para la aplicación a seres humanos. La dosis de referencia también debe contar para grupos de sociedades (como los niños) que pueden ser más sensibles a los químicos. Como se verá más adelante, las dosis de referencia se utilizan en las evaluaciones de riesgo para tomas orales de no carcinógenos al beber agua o ingerir alimentos.

La **concentración de referencia (RfC)** fue desarrollada como un estimado de una exposición a la inhalación (por respiración) para una duración determinada que es probable que no tenga un riesgo apreciable de efectos adversos a la salud durante una vida. La concentración de referencia puede considerarse como un estimado (con la incertidumbre de un orden de magnitud o mayor) de la exposición por inhalación continua a un no carcinógeno que probablemente no implique riesgo significativo para poblaciones humanas. La base de datos del IRIS proporciona valores separados para el RfD y el RfC.

6.5.3 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

El propósito de la **evaluación de la exposición** es el de determinar la extensión y frecuencia de la exposición humana a químicos específicos. Algunas de las preguntas que se responden mediante la evaluación de la exposición se enlistan en la tabla 6.9.

Tabla / 6.9

Algunas preguntas respondidas durante la evaluación de la exposición

¿Cuáles son las fuentes importantes de químicos (por ejemplo, aplicación de pesticida)?
¿Cuáles son las vías (por ejemplo, agua, aire, alimentos) y rutas de exposición (por ejemplo, ingestión, inhalación, contacto dérmico)?
¿A qué cantidad del químico está expuesta la gente?
¿Qué tan frecuente está expuesta la gente?
¿Cuánta incertidumbre se asocia con los estimados?
¿Qué segmentos de la sociedad (o ecosistema) tienen mayor riesgo?

La evaluación de la exposición también puede determinar el número de personas expuestas y el grado de absorción mediante varias rutas de exposición. Recuerde que el estudio de la evaluación de la exposición también deberá determinar la exposición de los individuos promedio en la sociedad y de los grupos de alto riesgo (por ejemplo, trabajadores, niños, mujeres, grupos en desventaja económica, adultos mayores, residentes de área). Los niños en general tienen una dieta más limitada que puede llevar a exposiciones relativamente más altas pero intermitentes. También hacen cosas como gatear y llevarse a la boca manos y objetos, lo cual resulta en una exposición incrementada a los químicos mediante la ingestión oral. Los adultos mayores y los incapacitados pueden tener estilos de vida sedentarios, lo cual cambia su exposición. Las mujeres embarazadas y en lactancia generalmente consumen más agua, lo que puede llevar a una diferente evaluación de la exposición. Por último, las muchas diferencias psicológicas entre los hombres y las mujeres, como el peso corporal y las tasas de inhalación, pueden llevar a diferencias importantes en las exposiciones.

La evaluación de la exposición también puede ser aplicada a una ubicación específica. Como se mencionó antes en este capítulo, la exposición adicional podría estar asociada con el hecho de vivir cerca de una carretera, incinerador, relleno sanitario o fábrica. Podría también estar asociada con el hecho de vivir o trabajar en un tipo particular de edificio, beber de una fuente de agua específica, o comer un tipo y cantidad particular de alimento. Se consideran muchos detalles, y un estudio científico va junto con cada uno de estos escenarios.

Tabla / 6.10

Algunas barreras clave para el redesarrollo de zonas industriales abandonadas

Elementos de responsabilidad.

Diferencias en los estándares de limpieza (pueden variar entre los gobiernos federal y estatal).

Incertidumbre de costos asociada con la evaluación de la contaminación y la limpieza.

Obtención de financiamiento, debido a que los prestamistas querrán que el gobierno deslinde responsabilidades asociadas con estos sitios.

Asuntos concernientes en la comunidad.

Recuadro / 6.5 Zonas industriales abandonadas

De acuerdo con la EPA, las zonas industriales abandonadas son "sitios comerciales e industriales abandonados, olvidados o subutilizados en donde la expansión o el redesarrollo es complicado debido a la contaminación ambiental real o percibida". En Estados Unidos existe un estimado de medio millón de zonas industriales abandonadas, principalmente ubicadas en áreas urbanas. Los asuntos concernientes en justicia ambiental y económica están asociados con estos sitios, debido a que muchas están ubicadas en las comunidades más pobres.

Desafortunadamente, las zonas industriales abandonadas típicamente permanecen olvidadas debido a que los compradores, los prestamistas y los desarrolladores habitacionales se alejan por razones de responsabilidad y buscan establecimientos de espacios verdes, esto es, espacios abiertos típicamente ubicados en las afueras de pueblos y ciudades. Sin embargo, el desarrollo de espacios verdes no es deseable para la sociedad y el medio ambiente debido a cuestiones como la pérdida de tierras de cultivo y su estilo de vida asociado, la pérdida de espacio abierto y el hábitat de la vida silvestre, y los problemas de inundaciones relacionados con la administración de aguas pluviales y la pavimentación, lo cual causa incremento en la escorrentía.

Otro conjunto de impactos no deseados asociados con el desarrollo de espacios verdes es que no existe infraestruc-

tura (a menos que sea un área urbana), así es que debe construirse y pagarse (lo cual consume energía y materia prima). En adición, la ubicación de empleos lejos del núcleo urbano pueden aislar a los empleadores de los trabajadores que no poseen un vehículo o tendrían que hacer diversos trasbordos de autobús para llegar a su sitio de trabajo. También, el desarrollo de espacios verdes generalmente resulta en problemas futuros de extensión y congestión.

En contraste, las zonas industriales abandonadas están normalmente ubicadas cerca de infraestructura de ambiente de construcciones existentes, transportación de masas y fuentes de trabajo. Por lo tanto, no existen beneficios económicos, sociales y ambientales claros para redesarrollar una zona industrial abandonada en vez de desarrollar un establecimiento de espacio verde.

La tabla 6.10 enlista algunas barreras clave para el redesarrollo de zonas industriales abandonadas. Escuchar las preocupaciones de la comunidad, atraer a los inversionistas y trabajar con unidades de gobierno locales en el planeamiento del proceso son componentes críticos del trabajo del ingeniero para un redesarrollo exitoso de zonas industriales abandonadas.

Puede saber más acerca de las zonas industriales abandonadas visitando el sitio de la EPA, www.epa.gov/brownfields.

Edificios verdes en zonas industriales abandonadas

<http://www.epa.gov/brownfields/sustain.htm>

Zonas industriales abandonadas en Nueva Jersey

<http://www.nj.gov/dep/srp/brownfields>

Debido a limitaciones de espacio, el enfoque será en cómo la evaluación de la exposición está relacionada con el uso de la tierra para propósitos residenciales, comerciales e industriales. Mucha de esta actividad está asociada con la toma de decisiones relacionada con propiedades de ingeniería abandonadas u olvidadas (denominadas **zonas industriales abandonadas**, comentadas en el recuadro 6.5) para algo que sea beneficioso para la sociedad y el medio ambiente. Muchas veces, las zonas industriales abandonadas son contaminadas por actividades pasadas en ese sitio. El redesarrollo de las zonas industriales abandonadas requiere que un ingeniero trabaje con un grupo diverso de los inversionistas –miembros de la comunidad, organizaciones no gubernamentales, funcionarios de gobierno, prestamistas financieros, agentes de bienes raíces y desarrolladores habitacionales– para lograr un uso de valor agregado para este sitio.

La tabla 6.11 muestra tres tipos de uso de suelo y parámetros asociados utilizados en una evaluación de exposición. Los tres tipos de uso de suelo considerados en la tabla 6.11 son residencial, industrial y comercial. Los ejemplos de actividades específicas que constituyen cada uso también se proporcionan en la tabla. La categoría de uso de suelo comercial es extremadamente variado, así es que se puede dividir en diferentes subtipos. Por ejemplo, el uso comercial puede incluir guarderías, escuelas, gasolineras, almacenes de maderas, edificios gubernamentales, oficinas de profesionales y negocios comerciales que sirven alimentos. En todos estos casos, existen distintos niveles de restricciones en cuanto al acceso público y distintos niveles de exposición para los trabajadores y los clientes.

La tabla 6.11 también calcula el consumo humano de químicos a través de mecanismos como beber agua, respirar aire e ingerir tierra (polvo). También puede existir contacto dérmico mediante el contacto directo con químicos o tierras contaminadas. Los cálculos de estas tasas de consumo (IR) están basados en estudios científicos, el tipo de individuo y la actividad que se lleva a cabo en el sitio.

Como podrá imaginarse, la especificidad del sitio está relacionada con la evaluación de la exposición. Por ejemplo, la tabla 6.12 muestra la cantidad de tierra que se adhiere al cuerpo y es ingerido a diario por poblaciones humanas específicas basadas en el uso de suelo y empleos asociados. Para determinar la adherencia a la tierra, los científicos necesitan conocer cuánta piel está expuesta a contacto dérmico potencial (piel) con los químicos y tierra contaminada. Como ejemplo, los científicos asumen que un trabajador adulto usa camisa de manga corta, pantalón largo y zapatos. La cantidad de área de superficie de piel expuesta al polvo y a la suciedad para estas suposiciones de ropa es también una función del peso corporal del trabajador. El área dérmica total disponible para el contacto entonces es asumida como 3 300 cm². Esto supone que la piel expuesta consiste de la cabeza (1 200 cm²), manos (900 cm²) y antebrazos (1 200 cm²).

Las condiciones climáticas como el recubrimiento de nieve y las condiciones de congelamiento no se supone que afecten la cantidad de tierra ingerida por el ser humano debido a que los estudios sugieren que hasta 80% del polvo en el aire de los interiores proviene de la tierra externa. Se cree que la tierra externa es transportada hacia adentro de los edificios mediante la deposición atmosférica, calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado y al tráfico peatonal. El ambiente del aire de interiores claramente afecta a la salud, especialmente debido a que, como se declaró antes, los estadounidenses gastan ahora 85% de su día en el interior de algún tipo de edificio. Sin embargo, la evaluación de la exposición dérmica a la tierra contaminada también consideraría las condiciones climáticas en las áreas del

Tabla / 6.11

Usos de suelo y suposiciones de evaluación de exposición asociadas con cada uso La EPA publica un *Manual de factores de exposición* que proporciona más detalles sobre valores específicos utilizados en la evaluación de la exposición (Centro Nacional para la Evaluación Ambiental, EPA/600/P-95/002F, 1997).

Uso de suelo	Ejemplos de este uso de suelo	Tasas de consumo (IR) de agua, inhalación de aire e ingestión de tierra*	Frecuencia de exposición (EF) (días por año) y duración de exposición (ED) (años)
Residencial (la actividad principal es residencial)	Viviendas de una sola familia, condominios, edificios de departamentos	<p>Toma de niños 1 L/día</p> <p>Toma de adultos 2 L/día</p> <p>Inhalación de adultos 20 m³/día</p> <p>Consumo de niños entre 1-6 años 200 mg tierra/día</p> <p>Adults consume 100 mg soil/day</p>	<p>Por tomar agua: EF: 350 días/año ED: 30 años</p> <p>Por inhalación de aire: EF: 350 días/año ED: 30 años</p> <p>Por ingestión de tierra ED: 6 años para niños entre 1-6 ED: 24 años para adultos EF: 350 días para niños y adultos</p>
Industrial (la actividad principal es industrial o la zonificación es industrial)	Fabricación, servicios, investigación y desarrollo industrial, almacenamiento de petróleo bruto	<p>Toma de adultos 1 L/día</p> <p>Inhalación de adultos 10 m³/día</p>	<p>Por tomar agua: EF: 245 días/año ED: 21 años</p> <p>Por inhalación de aire EF: 245 días/año ED: 21 años</p> <p>Por ingestión de tierra: ED: 21 años para adultos EF: 245 días para niños y adultos</p>
Comercial (el uso es un negocio o se pretende que sea para hospedar, educar o proporcionar cuidados para niños, adultos mayores, enfermos u otras subpoblaciones sensibles)	Guarderías, instalaciones educativas, hospitales, casa hogar para adultos mayores y centros de cuidado, tiendas de conveniencia, oficinas de profesionales, almacenes, gasolineras, autoservicios, instituciones financieras, edificios gubernamentales	<p>Toma de adultos 1 L/día</p> <p>Inhalación de adultos 10 m³/día</p>	<p>Por tomar agua EF: 245 días/año ED: 21 años</p> <p>Por inhalación de aire EF: 245 días / año ED: 21 años</p> <p>Por ingestión de tierra EED: 21 años para adultos EF: 245 días para niños y adultos</p>

*Recuerde que el peso promedio para un hombre, una mujer y un niño es, respectivamente, de 70 kg, 50 kg y 10 kg.

Tabla / 6.12

Cantidad de tierra que se supone se adhiere a la superficie de la piel y tomada diariamente para poblaciones específicas basadas en el uso de suelo y empleo asociado

Población objetivo	Adherencia de tierra (mg tierra/cm ² de piel)	Masa de tierra tomada tomada diariamente (mg/día)
Vida adulta en área residencial	0.07	50
Vida infantil en área residencial	0.2	200 para edades entre 1 a 6 100 para los demás
Trabajador adulto en comercial III	0.01	50
Trabajador adulto en comercial IV	0.1	50
Trabajador industrial	0.2	50

Comercial III se refiere a gasolineras, distribuidoras de autos, comercios varios. La población de trabajadores participa en actividades en la propiedad que son de naturaleza de intensidad de tierra baja.

Comercial IV se refiere a hoteles, oficinas, bancos. Una población de jardineros ha sido identificada como una población receptora adecuada. Participan en actividades en la propiedad que son de naturaleza de intensidad de tierra alta.

norte (recubrimiento de nieve y tierra congelada durante un periodo particular del año) que limita directamente el contacto entre la tierra y la piel.

Para los ingenieros, el conocimiento de la evaluación del riesgo y la exposición proporciona información para determinar si un sitio contaminado necesita ser remediado y, si es así, a qué nivel. La tierra contaminada y las aguas subterráneas en los sitios de zonas industriales abandonadas se pueden corregir utilizando tecnología de ingeniería. Alternativamente, las barreras tecnológicas e industriales se pueden utilizar para minimizar o prevenir la exposición. Por ejemplo, pavimentar un estacionamiento puede prevenir el contacto dérmico directo con tierras contaminadas que se encuentran debajo. Otro ejemplo, en este caso, para prevenir la exposición con aguas subterráneas contaminadas, sería que el título de propiedad estableciera una restricción sobre la colocación de pozos si una propiedad tiene el servicio de un abastecimiento de agua municipal.

6.5.4 CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO

Como se mostró previamente en la figura 6.5, la **caracterización del riesgo** toma en cuenta los tres primeros pasos en la evaluación del riesgo (evaluación del peligro, evaluación de la dosis-respuesta y la evaluación de la exposición). La caracterización del riesgo está específicamente determinada al integrar información sobre la dosis-respuesta y las evaluaciones de exposición. El proceso se desarrolla de forma diferente para los carcinógenos y los no carcinógenos.

Una pregunta importante es, ¿cuál es un nivel de riesgo aceptable? Los creadores de política y los científicos han determinado que un riesgo ambiental aceptable es un riesgo de vida de 1 oportunidad en un millón (10^{-6}) de un efecto adverso, y un riesgo inaceptable es 1 oportunidad en 1 000 (10^{-3}) de un efecto adverso.

Un riesgo 10^{-6} significa que si un millón de individuos fueran expuestos a un químico tóxico al mismo nivel y exposición, entonces 1 individuo tendría un efecto adverso debido a esta exposición. Un riesgo de 10^{-3} significa que un individuo sufriría un efecto adverso si 1 000 personas fueran expuestas a las mismas condiciones. Típicamente, los gobiernos estatal y federal han establecido el riesgo aceptable entre 10^{-4} y 10^{-6} , siendo 10^{-5} y 10^{-6} los valores más comúnmente utilizados en las políticas establecidas por dichos gobiernos. Estos valores representan el riesgo incrementado debido a la exposición al peligro sobre el riesgo de fondo.

En los ejemplos de las dos siguientes subsecciones, una caracterización de riesgo se puede utilizar para determinar una concentración admisible de un químico en el aire, agua o tierra para un riesgo aceptable. También se puede utilizar para determinar el riesgo ambiental resultante para un químico particular en una concentración dada y el escenario de exposición para dicho químico en un medio ambiente particular.

En el primer escenario, los creadores de políticas arreglarían el riesgo aceptable a un nivel predeterminado (por decir, 10^{-4} a 10^{-6}), y la concentración admisible del químico en un medio particular que resultaría en ese riesgo sería estimada. En la segunda situación, la concentración del químico en un medio particular es conocida y el riesgo es determinado.

CARCINÓGENOS Al desarrollar una caracterización de riesgo para carcinógenos, un punto importante es que la dosis se supone que es una dosis diaria promedio recibida por un sujeto durante una vida de exposición. Para los carcinógenos, una vida de exposición se supone que es de 70 años. Más adelante en esta sección se describe cómo se cuenta esta vida de exposición.

En términos simples, el riesgo asociado con los químicos carcinogénicos es igual a la dosis multiplicada por la unidad de riesgo asociada con una dosis de 1 mg/kg por día:

$$\text{riesgo} = \text{dosis} \times \text{riesgo por dosis de unidad} \quad (6.3)$$

Recuerde que para los carcinógenos, la unidad de riesgo asociada con una dosis de 1 mg/kg por día se llama el factor de pendiente.



Discusión en clase

Al determinar un nivel de riesgo aceptable, hay que tener en cuenta que muchos individuos que están asociados con un individuo cuya salud está dañada también son indirectamente dañados. La muerte o enfermedad de un individuo tiene un impacto emocional y financiero en los miembros de la familia, amigos y compañeros del individuo. También se asocian costos económicos y sociales más amplios con la muerte y la enfermedad de un individuo. Desafortunadamente, una caracterización de riesgo típica no captura estos impactos económicos y sociales. ¿Cuáles son sus sentimientos personales y profesionales acerca de este tema? ¿Son los mismos o difieren?

ejemplo/6.5 Riesgo determinante

En el ejemplo 6.3 se determinó que la dosis para un hombre adulto expuesto a un químico encontrado en el agua potable a 10 mg/L era de 0.29 mg/kg-día. ¿Cuál es el riesgo asociado con esta exposición? ¿Es aceptable este riesgo dentro de los lineamientos?

Suponga que esta dosis es aplicada durante una vida de 70 años y el químico encontrado en el agua es benceno, un carcinógeno conocido. La base de datos del IRIS proporciona un factor de pendiente oral de $0.055 \text{ (mg/kg-día)}^{-1}$ para la ingestión oral de benceno.

ejemplo/6.5 Continuación

solución

Recuerde que previamente se vio que el factor de pendiente iguala la unidad de riesgo para una ingesta crónica diaria de 1 mg/kg por día. Para determinar la caracterización del riesgo, multiplique la dosis por el factor de pendiente:

$$\text{riesgo} = 0.29 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}} \times 0.055 \frac{\text{kg-día}}{\text{mg}} = 1.59 \times 10^{-2}$$

Esta solución significa que si 100 individuos fueran expuestos a benceno a una concentración de 10 mg/L durante toda su vida, 1.59 individuos desarrollarían cáncer. Extrapolado a una población de 10 000, esto significa que si todos ellos tuvieran una exposición similar al benceno como la de este adulto, 159 individuos desarrollarían cáncer. Extrapolado a una población de 1 millón, se esperaría que 15 950 individuos desarrollaran cáncer.

Esto está muy por arriba de los riesgos aceptables de 1 en 10 000 (10^{-4}) y de 1 en un millón (10^{-6}). Esta es una razón por la que el nivel máximo de contaminantes (MCL) para el benceno en el agua potable es de 0.005 mg/L (o 5 µg/L), mucho más abajo que el valor de 10 mg/L establecido en este ejemplo.

El ejemplo 6.5 supone que los individuos fueron expuestos al químico carcinógeno durante su vida de 70 años. ¿Qué sucede en el caso en el que la exposición es en realidad menor que una vida entera de un individuo? Por ejemplo, suponga que la exposición ocurrió durante un periodo de empleo de 30 años cuando un trabajador estaba expuesto solo durante el horario de trabajo. En este caso,

$$\text{riesgo} = \text{dosis} \times \frac{\text{riesgo}}{\text{unidad de dosis}} \times \frac{\text{tiempo de exposición}}{\text{longitud del tiempo de vida}} \quad (6.4)$$

Recuerde que para los carcinógenos se supone que la exposición se lleva a cabo durante un periodo de vida (70 años); por lo tanto, la longitud del tiempo de vida se establece en 70 años. El término *longitud del tiempo de vida* en la ecuación 6.4 es referido como el tiempo promedio (AT) y típicamente tiene unidades de días. El AT para los carcinógenos se supone que sea de 25 550 días (70 años \times 365 días/año).

El *tiempo de exposición* en la ecuación 6.4 es la frecuencia de la exposición (EF) multiplicada por la duración de la exposición (ED). EF es el número de días que un individuo está expuesto al químico por año. ED es el número de años que un individuo está expuesto al químico.

La tabla 6.11 proporciona ejemplos de duraciones de exposición y frecuencias de exposición para distintas situaciones de uso de suelo. Por ejemplo, en el caso del uso residencial y una ruta de exposición de beber agua, el

EF se supone que es de 350 días/año (50 semanas) y se supone que el ED es de 30 años. La aplicación de este valor EF supone que un individuo pasa dos semanas lejos de su casa al año por vacaciones u otras actividades profesionales o familiares. La aplicación de este valor ED supone que un individuo reside en una casa durante solamente 30 años de su vida. Advierta las diferencias para otros usos de suelo. Por ejemplo, la tabla 6.11 muestra que, en un establecimiento industrial, un trabajador promedio está en el sitio de trabajo sólo 245 días al año (por lo que $EF = 245$ días/año) y tiene un historial de empleo promedio de 21 años ($ED = 21$ años).

Los supuestos valores de EF y ED se pueden utilizar para desarrollar una expresión para determinar la concentración aceptable de un químico en el agua potable para un riesgo aceptable establecido:

$$\text{concentración aceptable} = \frac{\text{riesgo aceptable} \times BW \times AT}{SF \times IR \times EF \times ED} \quad (6.5)$$

En la ecuación 6.5, BW es el peso corporal promedio de la población objetivo, e IR es la tasa de consumo, en este caso, 2 litros de agua al día (2 L/día).

La examinación cuidadosa de la ecuación 6.5 muestra que es similar a una mirada simple a la ecuación 6.4. Algunos parámetros se añadieron para definir los términos en la ecuación 6.4, y la ecuación se volvió a arreglar para establecer el problema para calcular la concentración aceptable en el agua potable en lugar del riesgo. La dosis también se oculta en la ecuación 6.5. Aquí, la dosis iguala al IR multiplicada por la concentración aceptable dividida entre el BW.

¿Cómo cambiaría el riesgo aceptable en el ejemplo 6.6 si la evaluación de exposición también mostrara que la población objetivo consumió 30 g de pescado al día? La respuesta es simple. No habría cambio alguno en el



Discusión en clase

Si quisiera diseñar un sistema de remediación para eliminar la exposición de los residentes a las aguas subterráneas contaminadas con toxafeno en el ejemplo 6.6, ¿cuáles son algunos métodos que podría usar? Podría diseñar, construir y operar un sistema de remediación de aguas subterráneas que bombeara el agua subterránea a la superficie y tratar el agua contaminada en un reactor aéreo. Otro acercamiento involucraría la trata del químico en su lugar utilizando tecnología in situ. Esta tecnología podría usar algún proceso biológico, químico o físico (o alguna combinación de los tres). ¿Cuáles son los otros métodos de no tratamiento para eliminar la exposición?

ejemplo / 6.6 Determinar una concentración admisible de un químico carcinógeno en el agua potable

Calcule una concentración admisible de aguas subterráneas para el químico toxafeno si el desarrollo residencial se sitúa sobre un acuífero de aguas subterráneas contaminado con toxafeno. Suponga que determina el riesgo para un adulto que pesa 70 kg y consume 2 L de agua por día del acuífero contaminado. El estado en el que trabaja ha determinado que un riesgo aceptable es la ocurrencia de 1 cáncer por 10^5 personas. Utilice los valores de la tabla 6.11 para la frecuencia de exposición y la duración de exposición proporcionados para el uso de suelo residencial.

solución

La base de datos del IRIS proporciona un factor de pendiente oral para el toxafeno de 1.1 por mg/kg-día. Recuerde que para los carcinógenos, el AT se supone que sea de 70 años. Al utilizar la ecuación 6.5 y los datos de exposición de la tabla 6.11, resuelve la concentración aceptable de toxafeno

ejemplo/6.6 Continuación

en el agua subterránea (suponiendo que la única vía de exposición es al beber agua contaminada):

$$\begin{aligned} \text{Concentración} &= \frac{70 \text{ kg} \times 10^{-5} \times 70 \text{ años} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{1\,000 \mu\text{g}}{1 \text{ mg}}}{\frac{1.1 \text{ kg-día}}{\text{mg}} \times \frac{350 \text{ días}}{\text{año}} \times 30 \text{ años} \times \frac{2 \text{ L}}{\text{día}}} \\ &= 0.77 \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \text{ o } 0.77 \text{ ppb}_m \end{aligned}$$

Advierta que si el riesgo aceptable fuera de 1 en 1 millón (10^{-6}), la concentración admisible de toxafeno se reduciría a $0.077 \mu\text{g}/\text{L}$ (o 0.077 ppb_m).

riesgo aceptable a menos que por alguna razón tuviera conocimiento de que se encontró toxafeno en el pescado. En este caso, el toxafeno se encuentra en el agua subterránea debajo del vecindario residencial. No se tiene información para sugerir que el pescado que estos individuos consumieron entró en contacto con el agua subterránea contaminada. Si el pescado entró en contacto con el químico, la ingestión del toxafeno en el pescado sería añadida al cálculo. Esto es, la exposición sería por beber 2 L de agua al día y

ejemplo/6.7 Determinar una concentración admisible de un químico en el aire de interiores

Suponga que el químico benceno, un carcinógeno conocido, se encuentra en el aire a una concentración constante de $1 \mu/\text{m}^3$. Calcule el riesgo de exposición a este benceno para un adulto promedio que pesa 70 kg e inhala 20 m^3 aire/día con una absorción de 50%. El factor de pendiente de inhalación del químico es de $0.015 \text{ (mg/kg-día)}^{-1}$.

solución

El riesgo es

$$\text{riesgo} = \frac{\frac{1 \mu\text{g}}{\text{m}^3} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 0.5 \times \frac{1 \text{ mg}}{1\,000 \mu\text{g}}}{\frac{0.015 \text{ kg-día}}{\text{mg}} \times 70 \text{ kg}} = 9.5 \times 10^{-3}$$

Este valor significa que, por cada 1 000 personas continuamente expuestas a este químico, 9.5 desarrollarían cáncer durante su tiempo de vida.

comer 30 g de pescado al día. La sección 6.6 proporcionará un problema de ejemplo que incluye exposición al agua y al pescado.

Otra solución sería investigar si existe una fuente de agua municipal cercana a dicha comunidad que pudiera servir como su fuente de agua potable. En este caso, una restricción escrita sería colocada en la propiedad para que los dueños individuales de propiedades no pudieran instalar un pozo de aguas potables. Más aún, un estudio hidrogeológico tendría que llevarse a cabo para evaluar si las aguas subterráneas contaminadas recaen hacia una corriente o río, en donde el químico podría ejercer toxicidad a la vida acuática o tal vez contaminar una toma de corriente de agua potable. Esta opción probablemente sea costosa y limpiará sólo la contaminación que se encuentra en el sitio. No prevendrá el hecho de que nuevas cantidades de éste u otro químico se introduzcan en el sitio.

NO CARCINÓGENOS Como se estableció antes, las caracterizaciones de riesgo desarrolladas para los no carcinógenos son manejadas en forma diferente que las de los carcinógenos. Recuerde que los no carcinógenos tienen una dosis umbral, por debajo de la cual no se cree que sucedan efectos adversos. Una dosis segura referida como la dosis de referencia (RfD) calcula (con una incertidumbre de una orden de magnitud o más) una dosis de tiempo de vida de un no carcinógeno que probablemente se encuentre sin riesgo significativo para las poblaciones humanas. La base de datos del IRIS, comentada antes, proporciona valores para las RfDs.

El riesgo aceptable para la exposición a un químico no carcinógeno se determina al calcular un **coeficiente de riesgo (HQ)**. Para la exposición a un carcinógeno, la dosis se supone que se aplica durante un tiempo de vida de 70 años. Los efectos no carcinógenos son evaluados sobre la duración de la exposición real, la cual puede ser corta. Por lo tanto, el HQ es la dosis diaria promedio de un químico recibida durante el periodo de exposición dividida entre la dosis de referencia (RfD).

$$HQ = \frac{\text{dosis diaria promedio durante el periodo de exposición}}{\text{RfD}} \quad (6.6)$$

Los HQs menores que o iguales a 1 son considerados seguros; los HQs mayores a 1 son considerados no seguros. Esto tendría sentido de un estudio cuidadoso de la ecuación 6.6. Si el HQ es igual a 1, la dosis diaria promedio a la que un individuo o comunidad está expuesto iguala la dosis de referencia (la dosis segura).

Recuadro / 6.6

Contabilidad de incertidumbres en la evaluación de la dosis-respuesta para proporcionar estimados de riesgo conservadores por unidad de dosis

En el proceso de evaluación de la dosis-respuesta, numerosas fuentes de incertidumbre provocan incertidumbre en los estimados de riesgo por unidad de dosis utilizados en la ecuación 6.3 para carcinógenos (el factor de pendiente) y no

carcinógenos (el coeficiente de riesgo). Sin embargo, la política pública se ha desarrollado y ahora toma en cuenta dichas incertidumbres que lleva a estimados conservadores de los valores usados en la caracterización del riesgo.

Recuadro / 6.6 Continuación

En el caso de los carcinógenos, el modelo lineal de dosis-respuesta aplicado comúnmente (figura 6.6) es conservador debido a que este modelo lleva a una respuesta más alta (riesgo) estimada a dosis más bajas que otros modelos, como el modelo multigolpes con forma de S y la curva dosis-respuesta con forma de U. Este es el caso común que debe ser extrapolado en los datos de dosis-respuesta generados utilizando estudios de animales de prueba para reducir significativamente las dosis humanas en las evaluaciones de riesgo. Más aún, la falta de un nivel de umbral en la relación de dosis-respuesta para los carcinógenos proporciona un estimado conservador de riesgo. Aun si la dosis fuera una *molécula* por kilogramo por día, se estima que existe algún riesgo de contraer cáncer si no se supone un nivel de umbral.

Para los no carcinógenos, la aplicación de los factores de incertidumbre (UF) al determinar los valores RfD y RfC (y por lo tanto, HQ) proporcionan estimados conservadores de valores HQ. Estos factores de incertidumbre cuentan para la variación en la susceptibilidad entre los miembros

de la población humana (variabilidad interindividuo o intraespecie), la incertidumbre al extrapolar datos animales a humanos (incertidumbre interespecie), la incertidumbre al extrapolar de datos obtenidos en un estudio con una exposición menor al tiempo de vida (extrapolar de exposición subcrónica a crónica), la incertidumbre al extrapolar de un nivel de efecto adverso de menor observancia (LOAEL) en vez de un valor NOAEL y la incertidumbre asociada con la extrapolación cuando la base de datos está incompleta.

La EPA ha comenzado a recomendar el uso del *método benchmark dose* o *dosis estándar* (definida como el límite estadístico inferior para una dosis correspondiente en un nivel específico de riesgo) para mejorar la calidad de los valores RfD y RfC y para reducir el número de factores de incertidumbre utilizados. Este acercamiento utiliza todos los datos disponibles para calcular el NOAEL, en vez de basarse en un punto simple. Este desarrollo proporciona un ejemplo de medios por los que la política pública está siendo continuamente mejorada en cuanto a la estimación del riesgo por valores de unidades de dosis.

ejemplo/6.8 Determinar el riesgo de químicos no carcinógenos

¿Existe un riesgo no seguro asociado con la inhalación diaria del aire con una concentración de $0.010 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del químico tolueno? En este problema verá los efectos no carcinógenos. La base de datos del IRIS establece que la inhalación RfD para el tolueno es de $0.114 \text{ mg}/\text{kg-día}$. Suponga que un adulto pesa 70 kg e inhala 20 m^3 de aire contaminado al día.

solución

Determine la dosis promedio diaria a la que el individuo está expuesto, y divida este valor entre el RfD para determinar el cociente de riesgo. La dosis promedio diaria es

$$\frac{0.010 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{\text{mg}}{1\,000 \mu\text{g}}}{70 \text{ kg}} = 2.8 \times 10^{-6} \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}$$

Utilice este valor y el RfD para determinar el HQ:

ejemplo/6.8 Continuación

$$HQ = \frac{2.8 \times 10^{-6} \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}}{0.114 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}}} = 2.5 \times 10^{-5}$$

Debido a que el HQ es mucho menor que 1, el riesgo es aceptable. Los individuos expuestos al químico tolueno deberían estar libres de efectos adversos en la salud en esta instancia.

La ecuación 6.6 y la información comentada previamente se pueden utilizar para desarrollar una expresión para determinar la concentración aceptable de un químico no carcinógeno en el agua potable:

$$\text{concentración aceptable} = \frac{HQ \times RfD \times BW \times AT}{IR \times EF \times ED} \quad (6.7)$$

Todos los términos en la ecuación 6.7 se han definido previamente: HQ es el coeficiente de peligro, RfD es la dosis de referencia, BW es el peso corporal de la población objetivo, AT es el tiempo promedio, IR es la tasa de consumo (en este caso, la tasa de consumo de agua), EF es la frecuencia de exposición y ED es la duración de la exposición.

ejemplo/6.9 Determinar las concentraciones aceptables de un químico no carcinógeno en el agua potable

Calcule la protección estándar de aguas subterráneas aceptable para el químico cloroformo, un químico clasificado como probable (pero no conocido) carcinógeno. Un desarrollo comercial es situado sobre un acuífero de aguas subterráneas contaminadas con cloroformo, y los establecimientos comerciales usarán el agua subterránea como una fuente de agua potable. Suponga que determina el riesgo para un adulto promedio que pesa 70 kg y consume 1 L de agua al día. Utilice los valores en la tabla 6.11 para la frecuencia de exposición y la duración de la exposición proporcionados para el uso comercial.

solución

La base de datos del IRIS dice que el RfD del cloroformo para la ingestión oral es de 0.01 mg/kg-día. La tabla 6.12 proporciona un EF de 245 días/año y un ED de 21 años. El AT para los no carcinógenos es típicamente de 30 años. La concentración aceptable de cloroformo en el agua subterránea

ejemplo/6.9 Continuación

(suponiendo que la única ruta de exposición es al beber agua contaminada) se encuentra en la ecuación 6.7:

$$\begin{aligned} \text{concentración aceptable} &= \frac{\text{HQ} \times \text{RfD} \times \text{BW} \times \text{AT}}{\text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}} \\ &= \frac{1 \times 0.01 \frac{\text{mg}}{\text{kg-día}} \times 70 \text{ kg} \times 30 \text{ años} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{1\,000 \mu\text{g}}{\text{mg}}}{1 \frac{\text{L}}{\text{día}} \times 245 \frac{\text{días}}{\text{año}} \times 21 \text{ años}} \\ &= 1\,490 \mu\text{g/L} \approx 1\,500 \mu\text{g/L} = 1.5 \text{ mg/L (o } 1.5 \text{ ppm}_m) \end{aligned}$$

Advierta las similitudes y diferencias entre las ecuaciones 6.7 y 6.5. Si el HQ en la ecuación 6.7 se establece a 1 (la dosis segura alta) y se multiplica por el RfD, el valor resultante es la dosis segura del químico. Este cálculo es diferente de, pero aún similar, al método para calcular la concentración aceptable para los carcinógenos en el que fue dictado primero un riesgo aceptable. Los términos en la ecuación 6.7 para la concentración aceptable, IR y BW están todos relacionados a la dosis real recibida por la población objetivo. Para los no carcinógenos, el tiempo promedio (AT) es típicamente supuesto de 30 años (no 70 años como con los carcinógenos).

6.6 Problemas más complicados con por lo menos dos rutas de exposición

Las evaluaciones de exposición pueden hacerse más complicadas que las mostradas en los ejemplos anteriores. Hasta este punto, la determinación de dosis asumió solo una ruta de exposición. Esta sección final investiga cómo el riesgo ambiental puede considerar diversas rutas de exposición a la vez y cómo algunos de los procesos de partición estudiados en los capítulos 3 y 5 son incorporados en problemas multimedia más complejos en los que un químico se comparte entre las fases de agua, aire y/o sólidas.

El primer ejemplo utilizará una caracterización de riesgo para determinar un estándar de calidad de agua de superficie para la que la evaluación de exposición identificó la ingestión al comer pescado contaminado que vive en dichas aguas en adición a beber el agua contaminada. El segundo ejemplo usará una caracterización de riesgo para determinar los estándares de limpieza aceptables para la tierra contaminada que en potencia puede filtrar verticalmente hacia la superficie y contaminar las aguas subterráneas que se encuentran abajo. En esta situación, el químico no sólo es disuelto en el agua intersticial de la tierra, sino que también puede ser absorbido al recubrimiento orgánico en las partículas de la tierra y/o dispersado hacia los huecos de espacio de aire que se encuentran en la estructura de la tierra. Ambos ejemplos requieren su conocimiento sobre cómo un químico se dispersa en el ambiente.

Tabla / 6.13

Supuestos de evaluación de exposición utilizados por 3 estados hipotéticos al establecer un estándar de calidad de agua para un químico que se bioacumula en el pescado

	Estado 1	Estado 2	Estado 3
Tasa de consumo de agua (L/día)	2	2	2
Peso corporal del adulto (kg)	70	70	70
Tasa de consumo de pescado (g/día)	6.5	30	15
Factores de bioacumulación, por ejemplo, concentración medida en el pescado dividida entre la concentración medida en el agua (L de agua/kg de pescado)	51 500	336 000 (agua fría) 84 086 (agua tibia)	7 310

6.6.1 ESTABLECER ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA CON BASE EN LA EXPOSICIÓN AL TOMAR AGUA Y COMER PESCADO

La tabla 6.13 proporciona información de tres distintos estados hipotéticos que se podrían usar independientemente para establecer un estándar de calidad de agua superficial para un químico hipotético. La examinación cuidadosa de la tabla 6.13 muestra que los tres estados obtendrían distintos estándares de calidad de agua para el mismo químico. ¿Cómo puede ser? Una mirada más profunda a la información en la tabla 6.13 indica que los estados utilizan diferentes supuestos en su evaluación de exposición.

Cada estado hipotético asume el mismo peso de un adulto (70 kg), la misma tasa de consumo de agua (2 L/día) y el mismo factor de pendiente de cáncer. Sin embargo, cada estado supone distintas tasas de consumo de pescado por la población adulta y una distinta magnitud de comportamiento de partición del químico del agua hacia el pescado (el factor de bioacumulación). Advierta que el estado 2 supone que el tipo de pescado encontrado en el agua fría tiene un mayor contenido de grasas (lípidos), por lo que el químico en cuestión (el cual es muy hidrofóbico) se dispersa a una mayor extensión en el pescado de agua fría que en el pescado de agua tibia.

La dosis total en este caso resulta de beber agua y comer pescado y, en este caso, la mayor parte de la dosis viene de comer pescado contaminado. Los factores de alta bioacumulación en la tabla 6.13 indican que la concentración del químico en el pescado es mucho más grande que en el agua de superficie al que el pescado es expuesto. Cuando se multiplica por la tasa de consumo diaria para el pescado, resulta un valor muy grande. Esto es debido a que, en este caso, el químico es muy hidrofóbico, así es que no pretende disolverse en una gran extensión en el agua pero en su lugar se dispersa en una gran extensión de la grasa (lípidos) del pescado de agua fría.



Discusión en clase

¿Cuáles son algunos segmentos de la sociedad que están expuestos a un riesgo mayor como resultado de comer pescado contaminado?

Con relación al tema de discusión, los segmentos de la sociedad expuestos a mayor riesgo por el consumo de pescado son probablemente los niños (dosis más alta a un peso corporal más bajo), mujeres embarazadas (tal vez el químico sea sospechoso de poner en peligro el desarrollo fetal) o pescadores recreacionales o de subsistencia que consumen más pescado o partes de pescado que contienen mayor contenido de lípidos que la población general (exposición incrementada debido al consumo incrementado). Este último grupo podrían ser los vacacionistas que consumen una mayor cantidad de pescado durante un tiempo corto durante un viaje de pesca. Más probablemente sean los individuos que dependen de este pescado para su subsistencia. Por ejemplo, en muchas partes de Estados Unidos, sus poblaciones nativas y de inmigrantes son conocidas por comer más pescado o partes de pescado que contienen mayores concentraciones de contaminantes que los que otras poblaciones consumen.

6.6.2 CÓMO DETERMINAR LOS ESTÁNDARES DE LIMPIEZA DE TIERRA ADMISIBLES QUE PROTEGEN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Ahora desvíe su atención para determinar un nivel de limpieza adecuado al que un ingeniero debería remediar en un sitio que contiene tierra contaminada. Para este problema particular, suponga una evaluación de exposición que indica que la tierra contaminada no posee una amenaza directa para los adultos o niños que coman tierra contaminada o respiren los vapores que pueden emitirse de la tierra contaminada. Este podría ser el caso para las fugas de los tanques de almacenamiento subterráneos en los que la contaminación se encuentra debajo de la superficie de la tierra y los vapores de tierra resultantes no alcanzan la superficie de la tierra. En este caso, el problema es que la tierra contaminada actúa como una fuente de contaminación, y el químico en cuestión puede filtrarse de la tierra y contaminar el agua subterránea que está por debajo. El agua subterránea puede servir como fuente de agua potable para una casa o municipio, o quizás el agua subterránea recargue una corriente, en donde el químico puede entonces ejercer toxicidad para la vida acuática. La figura 6.8 muestra la complejidad de este problema.

El resolver este tipo de problema requiere diversos pasos, detallados en la tabla 6.14. Enfoque sus esfuerzos en sólo uno de diversos cientos de químicos encontrados en los productos petroleros, benceno. También suponga que el agua subterránea no recarga una corriente, así es que no existe preocupación en cuanto al riesgo para un ecosistema acuático.

Asuma el uso residencial del agua subterránea, y el ejemplo 6.6 proporcionó información sobre la frecuencia de la exposición, la duración de la exposición y el tiempo promedio para este tipo particular de uso de suelo. La concentración de benceno admisible se determina como sigue (utilizando el factor de pendiente apropiado de $0.055 \text{ (mg/kg-día)}^{-1}$ de la base de datos del IRIS).

$$\text{concentración} = \frac{70 \text{ kg} \times 10^{-5} \times 70 \text{ años} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{1\,000 \text{ } \mu\text{g}}{\text{mg}}}{0.055 \frac{\text{kg-día}}{\text{mg}} \times \frac{350 \text{ días}}{\text{año}} \times 30 \text{ años} \times \frac{2 \text{ L}}{\text{día}}} \quad (6.8)$$

La concentración admisible se determina como $15 \text{ } \mu\text{g/L}$ (15 ppb_m).

Este valor es un factor de tres más alto que el máximo nivel de contaminantes (MCL) para el benceno, el cual es $5 \text{ } \mu\text{g/L}$. El MCL es el estándar ejecutable

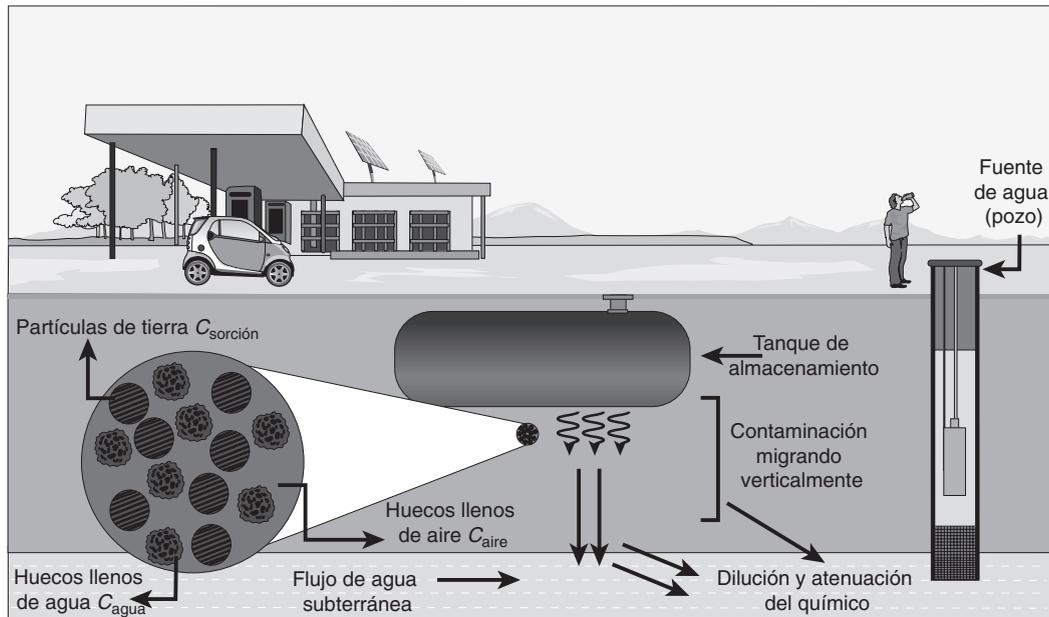


Figura 6.8 Complejidad de una situación en la que una fuga de un tanque de almacenamiento subterráneo ha descargado un químico que contamina las aguas subterráneas de la subsuperficie.

El químico puede dispersarse entre los huecos de aire en la tierra, los huecos llenos de agua en la tierra y los recubrimientos orgánicos en la tierra. La constante de Henry se utiliza para relacionar las concentraciones gaseosas y acuáticas del químico en equilibrio. Un coeficiente de partición de tierra-agua se utiliza para relacionar las concentraciones de las fases acuosas y absorbidas para el equilibrio de la sorción. El químico disuelto en el agua se puede filtrar verticalmente hacia el agua subterránea. En el proceso se puede atenuar química o biológicamente para diluirse mediante el agua subterránea limpia, cuesta arriba.

por el EPA, así es que este valor de defecto será utilizado para calcular el estándar de limpieza de tierra en los pasos subsecuentes. Los MCLs están basados en tratamientos de tecnología, asequibilidad y otros factores de factibilidad como la disposición de métodos analíticos, tecnología de tratamiento y costos para lograr varios niveles de remoción. Los lineamientos de la EPA en cuanto al establecimiento de un MCL dicen que los MCLs son estándares ejecutables y deberán ser puestos tan cerca como se pueda a las metas de máximo nivel de contaminantes (MCLGs) (metas de salud).

El paso 4 de la tabla 6.14 es el de determinar cómo la concentración del químico cambia conforme se mueve verticalmente a través de la zona no saturada hacia el agua subterránea. Un ingeniero podría desarrollar modelación hidrológica de punta para determinar el movimiento vertical del benceno de la tierra contaminada encontrado en la zona no saturada hacia la zona saturada que yace debajo. Por simplicidad, asuma que la migración de un contaminante de la tierra a las aguas subterráneas que yacen debajo tiene dos etapas. Primero, el químico debe dispersarse (de fases de sorción o gaseosa) hacia el agua intersticial que rodea el área contaminada. Después, la fuga resultante debe ser transportada verticalmente hacia las aguas subterráneas que yacen debajo. Mientras el químico disuelto es transportado hacia abajo con el agua que se filtra, puede ser transformado a una menor concentración mediante procesos químicos o biológicos que ocurren naturalmente.

Tabla / 6.14

Pasos para solucionar el problema de riesgo ambiental más complejo que sucede en los medios de tierra y aguas subterráneas

Paso	Procedimiento
Paso 1: Determinar el uso de suelo y las rutas de exposición	Suponga que existen aguas subterráneas que son actualmente usadas (o que se pueden usar en el futuro) como una fuente de agua potable para una casa o comunidad. Se supuso que el agua subterránea no recarga una corriente o río y que el agua subterránea potable contaminada es la única manera en la que la gente puede estar expuesta a la contaminación.
Paso 2: ¿Cuál es el riesgo aceptable?	Suponga que una entidad regulatoria ha establecido el riesgo aceptable en 10^{-5} .
Paso 3: ¿Cuál es el nivel aceptable del benceno en las aguas subterráneas?	Desarrolle una caracterización de riesgo para determinar la concentración del benceno en las aguas subterráneas contaminadas que no excederá el riesgo aceptable dictado en el paso 2. La concentración aceptable de benceno en las aguas subterráneas se encuentra en la ecuación 6.5 (repetida aquí): $\text{concentración aceptable} = \frac{\text{riesgo aceptable} \times BW \times AT}{SF \times IR \times EF \times ED}$
Paso 4: Determinar cómo la concentración del químico cambia mientras se mueve verticalmente a través de la zona no saturada hacia el agua subterránea	Esto se determina ya sea por un estudio hidrogeológico detallado o haciendo un supuesto que proporcione penetración hacia la dilución y atenuación del químico.
Paso 4a: Determinar la concentración admisible en la tierra del agua intersticial que rodea el sitio de contaminación de la concentración aceptable en el agua subterránea.	Utilice los resultados del estudio hidrogeológico o un factor de atenuación de dilución (DAF).
Paso 4b: Calcular una concentración admisible de tierra (benceno total por masa total de tierra mojada) de la concentración admisible de agua intersticial.	Aplique el conocimiento del balance de la masa y la partición de químicos entre el aire, la tierra y las fases acuosas.

También se puede diluir con el agua no contaminada que se topa y que se encuentra corriente arriba en el agua subterránea.

Por simplicidad, suponga que un valor de 16 cuenta para todos los procesos de dilución y atenuación. (Este valor es igual al utilizado realmente en algunos estados para determinar algunos reglamentos de limpieza de tierra basados en riesgo para el benceno, por ejemplo.) Esto es, la concentración de químicos en el agua intersticial que rodea la contaminación dividida entre 16 igualará la concentración en el agua subterránea a la que alguien podría estar finalmente expuesto.

El paso 4a es para determinar la concentración admisible en el agua intersticial de la tierra que rodea el sitio de contaminación de la concentración aceptable en el agua subterránea. Moviéndose de la concentración admisible en las aguas subterráneas hacia el agua intersticial, la concentración permitida de benceno en el agua intersticial dentro de la zona de tierra contaminada que se filtrará verticalmente para no afectar el agua subterránea es:

$$0.005 \text{ mg/L} \times 16 = 0.080 \text{ mg/L}$$

Recuerde que este valor de 0.080 mg/L no es la concentración a la que alguien estaría expuesto si se tomara el agua contaminada. El valor de 0.080 mg/L es la concentración admisible en el agua intersticial de la tierra contaminada. Se reducirá por dilución y atenuación para que la concentración que se encuentra finalmente en el agua subterránea sea de 0.005 mg/L.

El paso 4b es para calcular una concentración admisible de tierra (benceno total por masa total de tierra mojada) de la concentración admisible de agua intersticial. El paso final es para tomar la concentración de fase acuosa admisible en el agua intersticial (mg de benceno por L de agua) y convertirla a una concentración de tierra (mg de benceno por kg de tierra mojada). Para facilitar el problema, suponga que el sistema benceno-agua-aire-tierra se encuentra en equilibrio. Se determina la cantidad de benceno que es dispersada a equilibrio entre las fases del agua intersticial, los huecos de aire y la tierra absorbida.

Esta masa total del benceno (de las fases acuosas del agua intersticial, el aire y la absorción) que se contiene en una unidad de masa de tierra es lo que se mide si recolecta una muestra de tierra de la subsuperficie y solicita que un laboratorio analice la tierra. Este valor también puede considerarse como la concentración admisible de benceno que puede dejarse en la tierra (unidades de mg de benceno por kg de tierra) que, si se filtrara verticalmente, no resultaría en una concentración subsecuente en las aguas subterráneas que dañaría a la salud humana según dicta el riesgo aceptable.

Para llevar a cabo este cálculo, necesita información de la propiedad de la subsuperficie. Suponga que el sistema de subsuperficie es homogéneo, la porosidad de la tierra es de 0.3%, el contenido de carbono orgánico de la tierra es de 1% y la densidad de volumen de la tierra es de 2.1 g/cm³. Suponga también que un tercio de los espacios huecos de la tierra están llenos con aire y los otros dos tercios de los espacios huecos están llenos con agua.

La masa total del químico es igual a la masa del químico absorbido en la tierra más la masa de químico en los vacíos llenos de agua más la masa del químico en los vacíos llenos de aire. Matemáticamente, esta declaración puede ser escrita como sigue, utilizando información acerca de la partición del equilibrio (capítulos 3 y 5):

concentración admisible de tierra

$$= (C_{\text{agua}} \times K) + \left(\frac{C_{\text{agua}} \times \theta_{\text{agua}}}{\rho_b} \right) + \left(\frac{C_{\text{agua}} \times \theta_{\text{aire}} \times K_H}{\rho_b} \right) \quad (6.9)$$

Aquí, C_{agua} es la concentración de agua intersticial del químico determinada en el paso 4a (0.08 mg/L), K es el coeficiente de partición tierra-agua para el químico en cuestión, K_H es la constante sin dimensiones de la constante ley de Henry para el químico en cuestión, θ_{agua} es la porosidad de la tierra

llenada con agua, θ_{aire} es la porosidad de la tierra llenada con aire y ρ_b es la densidad de volumen de la tierra (que supuestamente es 2.1 g/cm^3).

En este caso se tienen los siguientes valores para estas variables:

- C_{agua} se determinó en el paso 4a como 0.080 mg/L .
- θ_{agua} , la porosidad de la tierra llenada con agua, es igual a la porosidad (0.3) multiplicada por la fracción de huecos que están llenos con agua ($2/3$ en este problema). En este caso, θ_{agua} es igual a 0.2 (expresado en unidades de $L_{\text{agua}}/L_{\text{total}}$).
- θ_{aire} , la porosidad de la tierra llenada con huecos de aire, es igual a la porosidad (0.3) multiplicada por la fracción de huecos que se llenan con aire ($1/3$ en este problema). En este caso, θ_{aire} es igual a 0.1 (expresado en unidades de $L_{\text{aire}}/L_{\text{total}}$).
- K , el coeficiente de partición tierra-agua, se puede calcular a partir del coeficiente de partición octanol-agua como se comentó en el capítulo 3. Suponga que el benceno tiene un $\log K_{\text{ow}}$ de 2.13 . Para el benceno, el coeficiente de correlación normalizado a carbono orgánico ($\log K_{\text{oc}}$) como 2.02 (K_{oc} es igual a $10^{2.02} \text{ L/kg}$ de carbono orgánico). Debido a que el contenido de carbono orgánico de la tierra fue declarado como 1% , la ecuación 3.32 se puede utilizar para determinar que K es 1.05 L/kg de tierra.
- El K_{H} para el benceno es de 0.18 a 20° C . Este valor es la reacción de un químico en la fase de aire yendo hacia la fase de agua. Las unidades de K_{H} en esta situación son, por lo tanto, $L_{\text{agua}}/L_{\text{aire}}$. Para simplificar el problema, suponga que la temperatura más fría de la subfase no afecta grandemente el comportamiento de la partición aire-agua del benceno.

Al insertar estos valores en los desconocidos de la ecuación 6.9, resulta en

$$\begin{aligned} & \text{concentración admisible de tierra} \\ & = \left(0.08 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1.05 \frac{\text{L}}{\text{kg de tierra}} \right) + \left(\frac{0.08 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.2 \frac{L_{\text{agua}}}{L_{\text{total}}}}{2.1 \frac{\text{g}_{\text{tierra}}}{\text{cm}^3} \times 1000 \frac{\text{cm}^3}{\text{L}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}_{\text{tierra}}}} \right) \\ & \quad + \left(\frac{0.08 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.18 \frac{L_{\text{agua}}}{L_{\text{aire}}} \times 0.1 \frac{L_{\text{aire}}}{L_{\text{total}}}}{2.1 \frac{\text{g}_{\text{tierra}}}{\text{cm}^3} \times 1000 \frac{\text{cm}^3}{\text{L}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}_{\text{tierra}}}} \right) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Al resolver las concentraciones de benceno en la fase de absorción, la fase de agua intersticial y los huecos de aire, respectivamente, resulta en

$$\begin{aligned} & \text{concentración admisible de tierra} \\ & = 0.084 \text{ mg/kg} + 0.0076 \text{ mg/kg} + 0.00069 \text{ mg/kg} \\ & \quad \text{(absorción)} \quad \text{(agua)} \quad \text{(aire)} \\ & = 0.092 \text{ mg de benceno/kg de tierra} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Esta concentración admisible de tierra de 0.092 mg/kg (0.092 ppm_m) es la concentración de benceno que puede permanecer en la tierra y aún así proteger el recurso de agua subterránea en los estándares de agua potable. Cualquier área de la tierra contaminada mayor a este valor tendría que removerse o remediarse hasta este nivel de limpieza más bajo.

Términos clave

- bioacumulación
- caracterización del riesgo
- carcinógeno
- carcinógenos sospechosos
- coeficiente de riesgo (HQ)
- concentración de referencia (RfCs)
- curva de dosis-respuesta
- desperdicio peligroso
- desperdicio sólido
- dosis
- dosis de referencia (RfDs)
- dosis letal mediana (LD₅₀)
- dosis límite
- efecto umbral
- efecto sin umbral
- epidemiología
- evaluación de la dosis-respuesta
- evaluación de la exposición
- evaluación de peligro
- evaluación del riesgo
- exposición
- factor de incertidumbre (UF)
- factor de pendiente
- factor de potencia
- interruptores endocrinos
- Inventario de liberación de tóxicos (TRI)
- justicia ambiental
- Ley de planeación contra emergencias y derecho de la ciudadanía a la información (EPCRA)
- Ley sobre conservación y recuperación de recursos (RCRA)
- Muir, John
- nivel de efecto adverso no observable (NOAEL)
- no carcinogénico
- percepción del riesgo
- peso de la evidencia
- poblaciones susceptibles
- riesgo
- riesgo ambiental
- toxicidad
- toxicidad aguda
- toxicidad crónica
- vías de exposición
- zonas industriales abandonadas



capítulo/Seis Problemas

6.1 ¿Cuál es la diferencia regulatoria en la RCRA entre una sustancia peligrosa y una tóxica?

6.2 Identifique varios tipos de riesgo durante su viaje todos los días a la escuela. ¿Cuál de estos riesgos se clasificaría como un riesgo ambiental?

6.3 Identifique las tres principales liberaciones de químicos en su ciudad o comunidad universitaria utilizando la base de datos del Inventario de Liberación de Tóxicos de la EPA. ¿Qué información puede encontrar sobre la toxicidad de estos químicos? ¿Es fácil o difícil encontrar esta información? ¿La información es consistente o es conflictiva? ¿Varía según la fuente (gobierno contra industria)?

6.4 *a)* Enliste un riesgo ambiental diferente asociado con un ambiente de interiores en el mundo desarrollado y el mundo en desarrollo. *b)* ¿Qué ocupantes de edificios particulares están en el mayor riesgo según los elementos que definió?

6.5 Regrese al capítulo 1 y visite el sitio web de la Organización Mundial de la Salud (www.who.org). Basado en dicha información, escriba un ensayo referenciado de dos cuartillas sobre el riesgo ambiental. ¿Cuánto riesgo ambiental existe por los factores como el agua y el saneamiento, aire de interiores, aire urbano y clima no seguros?

6.6 Si recuerda que la Agencia de Protección Ambiental define la justicia ambiental como “el trato justo y la participación significativa de todas las personas sin importar raza, color, nacionalidad de origen o ingresos con respecto al desarrollo, implementación y ejecución de las leyes, reglamentos y políticas ambientales”, investigue una cuestión de justicia ambiental en su ciudad o estado. ¿Cuál es la cuestión ambiental? ¿Qué grupos de la sociedad están siendo dañados por dicha cuestión ambiental? ¿Qué injusticia se está cometiendo?

6.7 En línea en www.scorecard.org puede buscar la ubicación y número de sitios de residuos peligrosos por ubicación. Úselo para buscar sitios de residuos peligrosos en una ciudad determinada. Comente sobre si el número y ubicación de sitios de desperdicio peligrosos posee alguna injusticia ambiental para los residentes de la comunidad que está investigando.

6.8 Enliste los cuatro componentes de una evaluación de riesgo completa.

6.9 El Sistema Integrado de Información de Riesgos (IRIS), una base de datos electrónica que identifica los efectos en la salud humana relacionados con la exposición a cientos de químicos, se encuentra disponible en www.epa.gov/iris. Visite la página IRIS y determine *a)* el peso del descriptor de la evidencia; *b)* la dosis de referencia (RfD) y *c)* el factor de pendiente en caso de que esté disponible para los siguientes seis químicos/sustancias: arsénico, metilmercurio, etilbenceno, metil etil acetona, naftaleno y el humo del escape de motor a diesel.

6.10 Suponga que un adulto inhala 23 m^3 de aire cada día y el factor de absorción por inhalación para el químico en cuestión es de 75% (por lo que 25% del químico es exhalado). Un análisis del viento muestra que la exposición es de 30% del tiempo en una base anual promedio. Suponga que un adulto vive en esta área durante todo su tiempo de vida, y que la concentración promedio de aire en la frontera de la propiedad de la fuente es de $0.044 \text{ mg}/\text{m}^3$. Determine la dosis para un hombre adulto en $\text{mg}/\text{kg}\text{-día}$.

6.11 *a)* Determine la dosis (en $\text{mg}/\text{kg}\text{-día}$) para un químico bioacumulativo con $\text{BCF} = 10^3$ que se encuentra en el agua a una concentración de $0.1 \text{ mg}/\text{L}$. Calcule su dosis para una mujer adulta de 50 kg quien toma 2 L de agua de lago por día y consume 30 g de pescado al día que es atrapado del mismo lago. *b)* ¿Qué porcentaje de la dosis total viene de la exposición al agua y qué porcentaje viene de la exposición al pescado?

6.12 Calcule un estándar de protección al agua subterránea basada en riesgo (en ppb) para el químico 1,2-dicloroetano para un dueño de residencia en donde el pozo personal utilizado para beber agua está contaminado con 1,2-dicloroetano. Suponga que está determinando el riesgo para un adulto promedio que pesa 70 kg. El estado en donde trabaja ha determinado que un riesgo aceptable es de 1 ocurrencia de cáncer por 10^6 personas. Utilice los valores de ruta de ingestión, frecuencia de exposición, duración de exposición y tiempo promedio previstos para el uso residencial en la tabla 6.11. Suponga un factor de pendiente oral para 1,2-dicloroetano de 9.2×10^{-2} por $(\text{mg}/\text{kg})/\text{día}$.

6.13 *a)* Calcule un estándar de protección al agua subterránea basado en riesgo para el químico benzo(a)pireno. Suponga que está determinando el riesgo para una mujer adulta promedio que pesa 50 kg y consume 2 L de agua y como 30 g de pescado al día. El estado ha determinado que un riesgo aceptable es de 1 ocurrencia de cáncer por 10^5 de

personas. Utilice los valores de frecuencia de exposición, duración de exposición y tiempo promedio provistos para el uso de suelo residencial. *b)* De acuerdo con el Sistema Integrado de Información de Riesgos (IRIS) de EPA, ¿qué tipo de cancerígeno es el benzo(a)pireno, utilizando el peso de evidencia de los estudios de seres humanos y de animales? *c)* Suponiendo que el químico se esté filtrando de alguna tierra contaminada, calcule la concentración admisible del benzo(a)pireno en el agua intersticial de la tierra contaminada.

6.14 ¿Existe un riesgo no seguro asociado con un adulto de 70 kg que come 15 g de pescado diario que contiene 1 mg/kg de metilmercurio? El metilmercurio ha demostrado causar discapacidad neuropsicológica en los seres humanos. El RfD para el metilmercurio es de 1×10^{-4} mg/kg-día.

6.15 ¿Existe un riesgo no seguro asociado con un adulto de 70 kg que come 15 g de pescado diario que contiene 9.8 µg/kg de arocloro 1254? El arocloro 1254 puede mostrar efectos carcinógenos en seres humanos. Utilice la base de datos del IRIS para encontrar cualquier otra información requerida para resolver este problema.

6.16 Las concentraciones de toxafeno en el pescado pueden provocar discapacidad en la salud humana y en los pájaros que comen peces (como el águila calva) que se alimentan de peces. *a)* Si el coeficiente de partición de octanol-agua ($\log K_{ow}$) para el toxafeno se supone que es igual a 4.21, ¿cuál es la concentración esperada de toxafeno en los peces? (Suponga que la concentración de toxafeno en la fase acuosa de equilibrio es de 100 ng/L.) *b)* Si se supone que una persona promedio bebe 2 L de agua no tratada diariamente y consume 30 g de pescado contaminado, ¿cuál ruta de exposición (beber agua o comer pescado) resulta en el mayor riesgo de toxafeno en 1 año? *c)* ¿Qué ruta de exposición es mayor para un grupo de mayor riesgo que se supone consume 100 g de pescado al día? Sostenga todas

sus respuestas con cálculos. Asuma que la siguiente correlación aplica al toxafeno y al pescado específico en este problema:

$$\log BCF = 0.85 \log K_{ow} - 0.07$$

6.17 Identifique una zona industrial abandonada en su comunidad, ciudad o una ciudad cercana. ¿Qué se hizo específicamente en el sitio? ¿Cuáles son los diversos impactos sociales, económicos y ambientales asociados con la restauración del sitio de la zona industrial abandonada?

6.18 El Código de Reglamentos Federales (CFR) es la codificación de los reglamentos generales y permanentes publicados en el Registro Federal por los departamentos y agencias ejecutivas del Gobierno Federal de Estados Unidos. Puede accederlo en <http://www.gpoaccess.gov/cfr/>. ¿Qué número de CFR está asociado con las siguientes secciones? (por ejemplo, 50 CFR para la Vida Silvestre y la Pesca). *a)* Protección del Medio Ambiente; *b)* Transportación; *c)* Conservación de Fuentes de Energía y Agua; *d)* Salud Pública y *e)* Carreteras.

6.19 Nairobi es una ciudad en Kenya, África. Utilice el siguiente sitio web para obtener el Reporte "Mirada al Medio Ambiente de la Ciudad de Nairobi": http://www.unep.org/DEWA/Africa/docs/en/NCEO_Report_FF_New_Text.pdf. Desarrolle una tabla que muestre las 10 principales causas de mortalidad en Nairobi en el año 2000.

6.20 Investigue la seguridad de los productos de su cuidado personal y de la limpieza del hogar utilizando un sitio web como <http://lesstoxicguide.ca/index.asp?fetch=personal>. Desarrolle una tabla que enliste 7 productos actuales de cuidado personal o de limpieza del hogar utilizados en su departamento, hogar o dormitorio. Añada una segunda columna que enliste una alternativa menos riesgosa para cada uno de los 7 productos.

Referencias

Fisk, W. J. 2000. "Health and Productivity Gains from Better Indoor Environments and Their Relationship with Building Energy Efficiency". *Annual Review of Energy and the Environment* 25:537-566.

Friends of Earth. 2009. "Endocrine Disrupting Pesticides", <http://www.foe.co.uk/index.html>, accesado el 21 de febrero de 2009.

Meuser, M. y A. Szacz. 2000. "Unintended, Inexorable: The Production of Environmental Inequalities in Santa Clara County, California". *American Behavioral Scientist* 43 (4): 602.

Mihelcic, J. R. 1999. *Fundamentals of Environmental Engineering*. Nueva York: John Wiley & Sons.

National Science and Technology Council. 1996. The Health and Ecological Effects of Endocrine Disrupting Chemicals: A Framework for Planning. Committee on Environmental and Natural Resources. <http://www.epa.gov/endocrine/pubs/framework.pdf>, accesado el 18 de noviembre de 2008.

Patnaik, P. 1992. *A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.