

# Comparación de los efectos de diversas fuentes de energía en el medio ambiente y la salud

*Informe sobre los resultados basado en un documento temático presentado en Helsinki*

por  
S. Haddad y  
R. Dones

Los primeros intentos de comparar las repercusiones para el medio ambiente y la salud de los diferentes sistemas de producción de electricidad se realizaron en el decenio de 1970. En aquel momento era necesario tomar decisiones básicas en cuanto al mejor modo de satisfacer el rápido crecimiento de la demanda de electricidad. Los promotores de esta generación de estudios comparativos se inspiraron fundamentalmente en el deseo de colocar en una escala unidimensional de riesgos las diversas opciones de que se disponía en aquel entonces, atendiendo a sus efectos negativos sobre el público en general.

En los primeros estudios se abordaban instalaciones aisladas o por separado porque la principal preocupación que manifestaba la población era inquietud por el hecho de vivir en los alrededores de centrales eléctricas. Desde entonces, ha aumentado el alcance de los estudios comparativos con la elaboración de metodologías conexas. Pronto se hizo evidente que para lograr una comparación justa de las diferentes opciones de generación de electricidad, era necesario examinar todo el espectro del ciclo completo de los sistemas energéticos.

El siguiente paso en la evolución de los estudios comparativos fue incluir las fases de construcción y desmantelamiento de las instalaciones. De hecho, los análisis revelaron que, en la mayoría de las instalaciones, esos eran los principales factores de riesgo.

Al incluir la fase de construcción se abrió el camino para comparaciones aún más amplias, tales como

los efectos vinculados a la producción de los materiales que se utilizan para fabricar el equipo necesario. Dentro de una perspectiva tan amplia, la comparación de las repercusiones en la salud y el medio ambiente se está reincorporando a agregados macroeconómicos como las inversiones o el empleo, y se acerca a la idea de la "evaluación tecnológica". Con la segunda generación de estudios comparativos, el cambio principal reside en la importancia que se le atribuye al contexto de adopción de decisiones del proceso de evaluación comparativa de riesgos.

Se reconoce en general que el objetivo de clasificar a los diferentes sistemas de producción de electricidad es conocer mejor las ventajas de cada sistema energético. Ahora el interés se ha centrado en la integración de los efectos en la salud y el medio ambiente en escenarios alternativos de producción de electricidad que comprenden diversas fuentes de energía, y en la comparación de esos escenarios dentro de contextos socioeconómicos específicos, ya sea a nivel local, regional o nacional.

Cabe señalar que en los estudios comparativos realizados hasta la fecha se han abordado en mucho menor grado los efectos medioambientales de los diferentes tipos de fuentes de energía que sus efectos en la salud.

## Comparación de los riesgos para la salud

La Dirección de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE) realizó un amplio estudio crítico de los anteriores análisis comparativos de los riesgos. En el estudio de la HSE (de 1980) se destacan en particular las deficiencias al agregar diversas dimensiones del riesgo en un sólo indicador, así como la incertidumbre resultante de cuantificar determinados riesgos que no se avienen a la cuantificación; en particular las relaciones dosis/efecto, incluidas las

El Sr. Haddad y el Sr. Dones son funcionarios de la División de Seguridad Nuclear del OIEA. Este artículo se basa en el Documento temático N° 3 elaborado por un grupo de expertos internacionales bajo la dirección de M.J. Chadwick del Reino Unido, para el Simposio de Expertos Superiores sobre electricidad y medio ambiente, celebrado en Helsinki en mayo de 1991. El informe completo ha sido publicado por el OIEA con el título *Electricity and the Environment* (septiembre de 1991).

consecuencias tardías y a largo plazo de la exposición a sustancias químicas.

En el informe de la HSE se señala que, por lo general, se conocen mejor los riesgos nucleares que los no nucleares, y se exhorta a una mayor comprensión de: a) la importancia de los límites superiores e inferiores de los supuestos efectos crónicos del azufre; b) los efectos a largo plazo de los desechos no nucleares; c) los posibles accidentes graves asociados con determinadas centrales no nucleares; y d) la distinción entre el riesgo medio de un sistema y el relacionado con las variaciones marginales.

El estudio realizado por A. F. Fritzsche (en 1989) es una de las reseñas más actuales y complejas de la evaluación comparativa de riesgos para diferentes fuentes de energía. Los resultados se basan ampliamente en la literatura internacional sobre riesgos, que se revisa críticamente. En los resultados obtenidos a partir de este estudio se diferencian cuidadosamente las diversas dimensiones del riesgo, específicamente las relacionadas con las condiciones normales y de accidente, y se toman como representativas de las grandes centrales eléctricas modernas que podrían construirse actualmente en Europa. (Véanse los gráficos.)

Aunque los diversos sistemas energéticos se pueden clasificar desde la perspectiva de los riesgos para la salud, los valores absolutos se deben analizar e interpretar con cautela y de forma relativa, debido a las variaciones que existen entre los diversos emplazamientos y tecnologías.

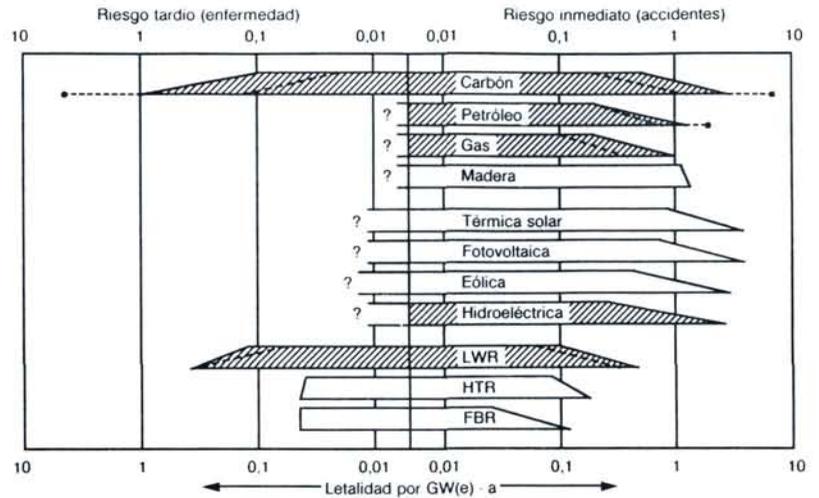
Teniendo en cuenta las reservas antes expresadas a la hora de interpretar los resultados, y partiendo de las conclusiones del estudio de Fritzsche (con excepción de los accidentes graves), se pueden hacer las siguientes conclusiones comparativas acerca de la repercusión de los riesgos para la salud:

- **Riesgo profesional inmediato:** Para el ciclo del carbón, el riesgo profesional inmediato es visiblemente mayor que en los casos del petróleo y el gas; es del mismo orden de magnitud que los relacionados con los sistemas energéticos renovables y de 8 a 10 veces mayor que los riesgos correspondientes a los reactores de agua ligera (LWR). Es posible que los futuros avances tecnológicos en el uso de las fuentes renovables de energía solar y eólica permitan reducir considerablemente el riesgo profesional inmediato en estos sistemas (hasta un factor de cuatro). La generación de electricidad mediante energía hidroeléctrica sigue siendo una opción comparativamente insegura desde el punto de vista del riesgo profesional inmediato.

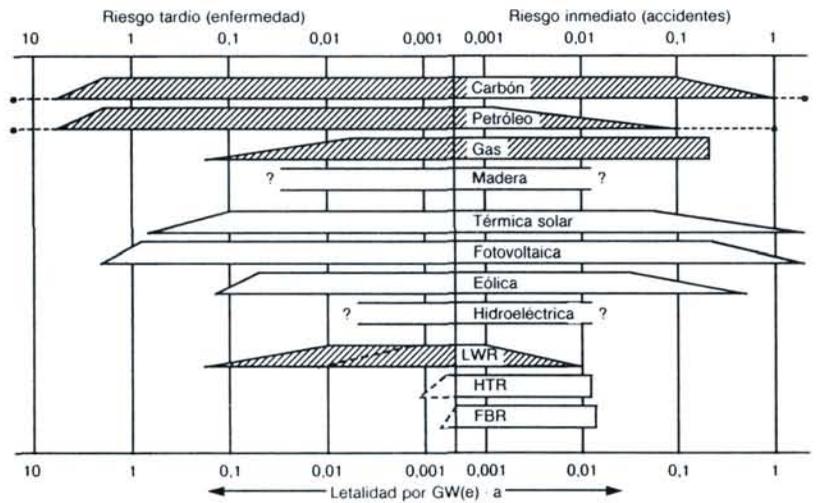
- **Riesgo profesional tardío:** Los casos de letalidad tardía se presentan fundamentalmente en la explotación de minas de carbón y uranio, y en ambas tienen el mismo orden de magnitud. Sin embargo, sobre la base de una media por unidad de electricidad generada, la explotación de minas de carbón subterráneas parece ser más peligrosa que la explotación de minas de uranio subterráneas.

- **Riesgo público inmediato:** Estos riesgos se deben fundamentalmente a accidentes durante el transporte, y dependen en gran medida de las distancias recorridas y la modalidad de transporte. El riesgo de la opción nuclear es de 10 a 100 veces menor que el del resto de las opciones, principalmente por la cantidad de material relativamente pequeña que

### Riesgos de mortalidad debidos a la producción de electricidad Riesgo profesional de mortalidad



### Riesgo de mortalidad pública



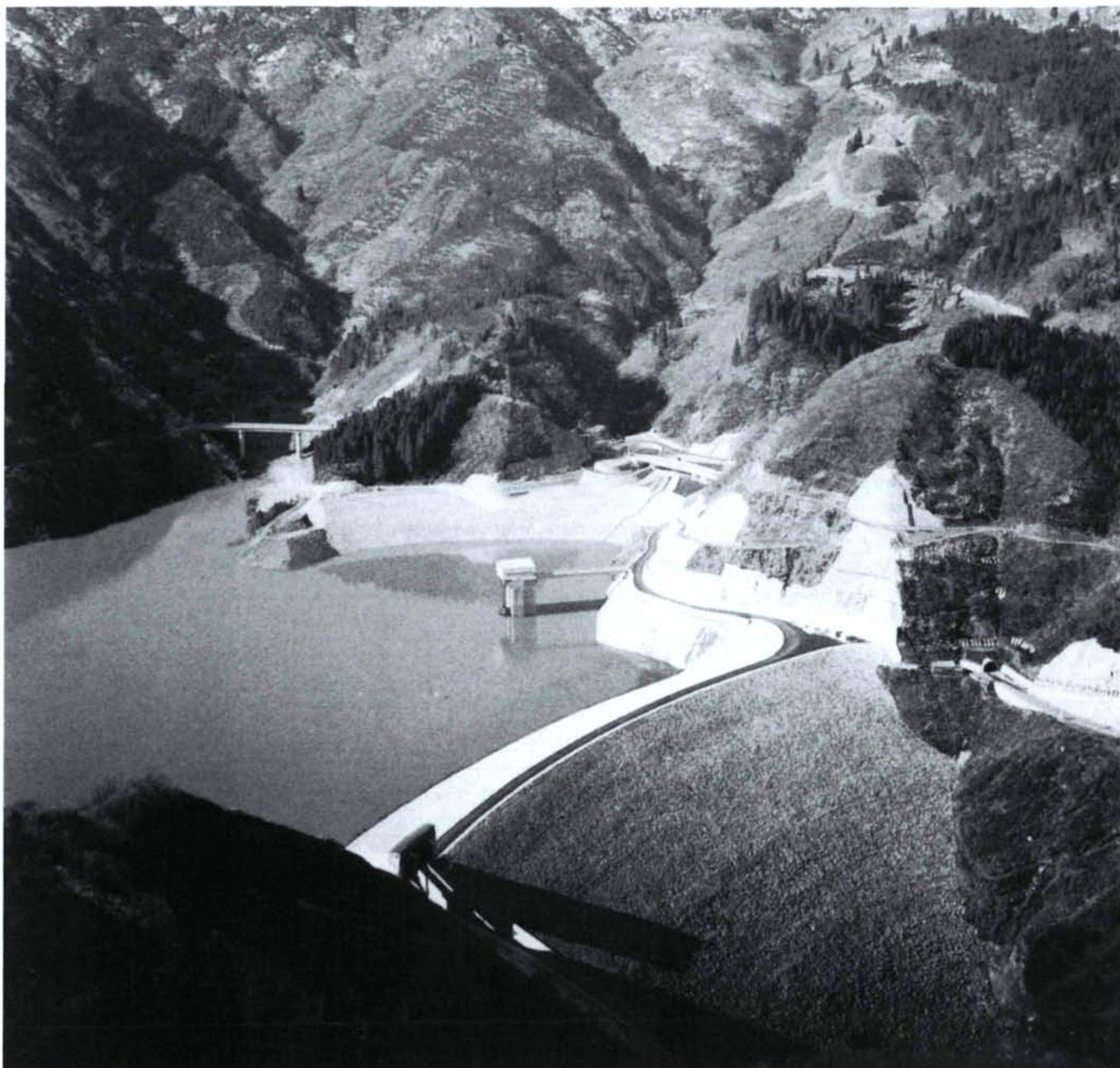
Notas: En las estimaciones se consideran todas las etapas del ciclo del combustible, pero no se tienen en cuenta los accidentes graves. LWR = reactor de agua ligera; HTR = reactor de alta temperatura; FBR = reactor reproductor rápido

Fuente: Adaptado de A. F. Fritzsche, "The Health Risks of Energy Production", Risk Analysis 9, No. 4 (1989).

debe transportarse por unidad de electricidad producida. Del mismo modo, el ciclo del carbón tiene el riesgo público inmediato más elevado dada la necesidad de transportar grandes cantidades de material.

- **Riesgo público tardío:** La estimación del riesgo público tardío de todas las fuentes de energía lleva asociada una gran incertidumbre y, por lo tanto, los resultados deben interpretarse con mucha cautela. Esos resultados indican que los riesgos públicos tardíos para la energía nuclear y el gas natural son del mismo orden de magnitud, que es por lo menos 10 veces inferior a los del carbón y el petróleo. También debe señalarse que los riesgos públicos tardíos para determinados tipos de fuentes renovables son también relativamente altos, aunque se espera que el progreso que se alcance en el futuro permita reducirlos significativamente.

Estos gráficos reflejan las diferencias que emanan de las diversas fuentes de datos y las diversas instalaciones, procesos y frecuencias en lo que respecta a accidentes: las barras sombreadas son los datos de riesgos comprobados; las que no están sombreadas son datos dudosos. Los bordes oblicuos de las barras indican el alcance de los datos sobre riesgos.



En Japón, la electricidad se produce a partir de energía nuclear e hidroeléctrica. En la foto aparece la central hidroeléctrica Tedorigawa Daiichi. (Cortesía: JAERI)

### Comparación de los riesgos medioambientales

Las repercusiones en el medio ambiente no se pueden comparar de un ciclo del combustible a otro, como se hace con los efectos en la salud. La gran cantidad de organismos afectados, el hecho de que las unidades implicadas sean ecosistemas en lugar de organismos, poblaciones o especies individuales, y la necesidad de distinguir los efectos de las diferentes sustancias en las funciones y estructuras de los ecosistemas, significa que tal vez sea prácticamente imposible hacer comparaciones numéricas directas. Hasta ahora no se ha reconocido ninguna característica funcional o estructural cuyo cambio permitiría

utilizarla como medida numérica para realizar comparaciones efectivas. Es por ello que se han propuesto otros medios de comparación.

- **Evaluación mediante la clasificación:** Este método permite realizar comparaciones generales. No se trata de dar una medida global del efecto; sino que se presentan cualitativamente en forma de matriz las repercusiones medioambientales debidas a diferentes perturbaciones provenientes de las diversas etapas de los ciclos de combustible. Hasta cierto punto, esta es una característica valiosa de dichas representaciones porque, lejos de ocultarse, se destacan las diferencias más insignificantes.

- **Valores de emisión e índices de calidad del ambiente:** Los valores de las emisiones y efluentes se

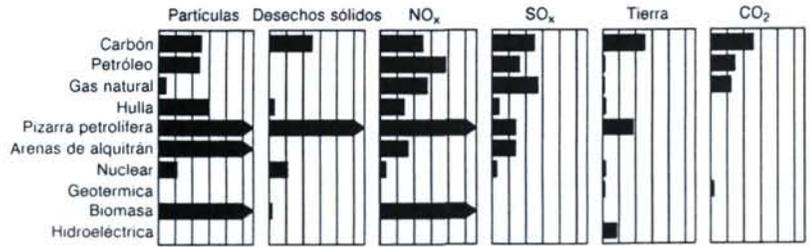
pueden utilizar para evaluar las posibles repercusiones de los diversos combustibles y tecnologías. (Véanse los gráficos.) Esta suma de las emisiones pone de relieve algunas observaciones interesantes, entre ellas el hecho de que el total de emisiones suspendidas en el aire atendiendo a la masa por unidad de energía es casi idéntico para cualquiera de los grupos de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), y que el ciclo de combustible del gas natural produce emisiones de SO<sub>2</sub> relativamente altas (sobre todo durante la etapa de extracción) en comparación con otras fuentes de energía salvo el carbón (fundamentalmente en la etapa de conversión). El orden de magnitud del total de emisiones de CO<sub>2</sub> por gigavatio eléctrico por año (GWe/a) para todo el ciclo del grupo de combustibles fósiles utilizados para la producción de electricidad, es aproximadamente dos veces mayor que el total de CO<sub>2</sub> emitido en el ciclo del combustible de cualquier otra fuente de energía. Dentro del grupo de los combustibles fósiles, el total de emisiones de CO<sub>2</sub> por cada GWe/a (para todo el ciclo del combustible) en los ciclos de generación de electricidad mediante quemado del carbón casi duplica el total de emisiones producidas por el petróleo o el gas.

● **El método de la carga crítica y la carga límite:** En este método se utilizan los valores de carga crítica o carga límite (o nivel) asignados a determinadas zonas dentro de una región, y se comparan con los depósitos (o concentraciones) reales de un contaminante. Por ejemplo, el exceso de carga crítica (o límite) por depósito se puede tomar como medida cuantitativa de la repercusión o el efecto. Este método puede desarrollarse aún más. Los resultados de diversas estrategias de reducción (por ejemplo, la aplicación de todas las tecnologías posibles a una central eléctrica) se pueden comparar en lo que respecta a los excesos (y se indicará la reducción y el costo total). Posteriormente esto puede compararse con los mapas de excesos donde se hayan simulado otras estrategias (o no se haya reflejado ninguna). (Véase el cuadro.)

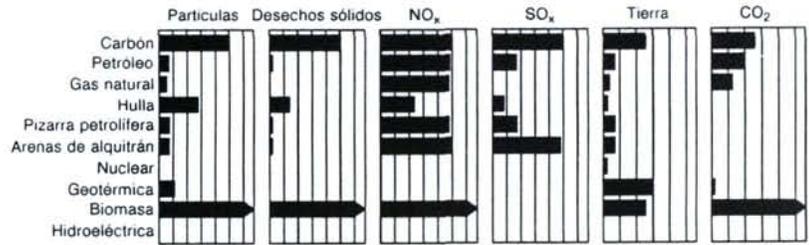
● **Comparaciones integradas de la repercusión medioambiental:** La falta de una buena metodología para las comparaciones de la repercusión medioambiental de los diversos ciclos del combustible dentro del sistema de generación de electricidad no significa que no puedan realizarse comparaciones útiles. Además, a medida que se reúnan datos surgirá una metodología fiable. La evolución de las evaluaciones del exceso de carga crítica y el reconocimiento gradual de las relaciones dosis/respuesta que intervienen en estos excesos, permitirán llegar a las comparaciones cuantitativas.

En la actualidad, los valores de emisión, o un índice combinado de ellos, permiten realizar comparaciones cualitativas. Saltan a la vista las diferencias que existen entre las emisiones a la atmósfera de diverso origen, desde los combustibles fósiles hasta las tecnologías solares, y la nuclear. De modo análogo, dentro de una misma categoría de combustibles se observa claramente una escala de diferencias. Asimismo, los valores de los excesos permiten clasificar las consecuencias, y cuando se hace un esfuerzo integral en este sentido, se puede apreciar la dirección principal de la repercusión de las diversas tecnologías. Por ejemplo, los efectos que tiene la uti-

**Comparación de los valores de las emisiones y efluentes**  
**Emisiones y residuos de diferentes fuentes de energía**



**Emisiones basadas en la etapa de conversión**



Observaciones: Los gráficos no están trazados en escala absoluta. No se han evaluado las emisiones de dióxido de carbono de la hulla, la pizarra petrolífera, y las arenas de alquitrán. Atendiendo a la masa, los desechos sólidos del ciclo de conversión de la energía nuclear son de un orden de magnitud tres o cuatro veces menor que el del carbón.

Fuente: Tomado de "The Environmental Impacts of Production and Use of Energy", Parte IV. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Rep. ERS-14-85, Nairobi (1985)

lización de combustible fósil a nivel mundial debido a las emisiones de CO<sub>2</sub>, son más evidentes que los de otras tecnologías, al igual que las posibles repercusiones regionales en la atmósfera. Esa representación permite a los planificadores concentrarse en los principales motivos de preocupación.

**Riesgos de accidentes graves**

En todos los sistemas energéticos y en todas las etapas de sus ciclos del combustible pueden ocurrir accidentes graves (generalmente definidos como accidentes que entrañan un riesgo significativo fuera del emplazamiento para las personas, las propiedades y el medio ambiente). Los accidentes pueden ser provocados por fallos mecánicos o estructurales, deficiencias en el proceso, errores humanos, o acontecimientos externos tales como los fenómenos naturales (terremotos y huracanes).

Partiendo de una media por unidad de electricidad producida, al parecer la opción hidroeléctrica genera más muertes inmediatas por accidente grave que ninguna otra fuente de energía. A la hora de comparar accidentes graves en diversos sistemas energéticos es necesario examinar aspectos específicos:

● Cabe destacar dos consideraciones metodológicas principales: en primer lugar, estos riesgos de-

En estos gráficos se comparan los valores correspondientes a diversos combustibles que se utilizan para generar electricidad. Los datos de las emisiones se tomaron de los resultados de un amplio estudio comparativo medioambiental realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

### Emisiones de azufre con la aplicación de la máxima reducción posible para el sector de la electricidad en Europa en el año 2000

Pais	Sin reducir	Azufre eliminado	%	Costo
Albania	200	64	32	23
Austria	186	68	37	90
Bélgica	282	90	32	137
Bulgaria	1 151	630	55	256
Checoslovaquia	1 303	723	55	301
Dinamarca	193	121	63	192
Finlandia	203	36	18	119
Francia	697	130	19	354
Rep. Dem. Alemana*	3 224	2 166	67	668
Alemania*, Rep. Fed. de	1 499	799	53	1 214
Grecia	523	396	76	255
Hungría	805	479	60	189
Irlanda	100	55	55	74
Italia	1 311	612	47	939
Luxemburgo	18	0	0	0
Países Bajos	210	65	31	117
Noruega	71	1	1	3
Polonia	2 182	1 006	46	618
Portugal	205	66	32	84
Rumanía	1 322	725	55	325
España	2 126	1 556	73	600
Suecia	219	29	13	111
Suiza	54	7	13	16
Turquía	1 755	700	40	301
URSS	10 890	6 241	57	2 075
Reino Unido	1 765	974	55	1 474
Yugoslavia	1 891	1 209	64	536
<b>Total</b>	<b>34 385</b>	<b>18 948</b>	<b>55</b>	<b>11 068</b>

Nota: Las emisiones están expresadas en miles de toneladas. Los costos en millones de dólares de los Estados Unidos (1985).

\* Estos datos se estimaron antes de la unificación de Alemania en octubre de 1990.

Fuente: M. J. Chadwick, Stockholm Environment Institute (1990).

ben presentarse y compararse independientemente del riesgo inherente a las operaciones habituales; en segundo lugar, los datos basados en hechos históricos (reales) no deben compararse directamente con datos basados en predicciones probabilistas de posibles acontecimientos futuros.

● La comparación no debe basarse solamente en las consecuencias de este tipo de accidentes. También debe tomarse en cuenta la probabilidad de su ocurrencia. De ahí que sea importante estimar la frecuencia de estos accidentes. Para ello se necesita una información fiable acerca del historial de accidentes graves y sus efectos, o la aplicación de métodos probabilistas para predecir la posibilidad de su ocurrencia futura, o ambas cosas.

● Es difícil evaluar y comparar la frecuencia de los accidentes graves y los daños para la salud y el medio ambiente que provocan, porque no existe un organismo nacional o internacional dedicado exclusivamente a la recopilación sistemática de esos datos. Esto sucede en particular con los sistemas de energía no nuclear. Los datos sobre los incidentes y accidentes del ciclo de combustible nuclear son más asequibles y sistemáticos que los de otros sistemas energéticos.

● Prácticamente no existen datos ni estimaciones de los efectos en la salud tardíos de los accidentes graves específicamente para los sistemas energéticos no nucleares. En esos casos, todos los efectos en la salud se declaran como muertes inme-

diatas, y pocas veces se informa sobre el número de heridos. Por ello resulta difícil una comparación completa, ya que es posible que se subestime la repercusión total de los sistemas energéticos no nucleares.

● Es difícil determinar los efectos en el medio ambiente finales a largo plazo, en especial para los accidentes graves. Dado que los ecosistemas se exponen una sola vez o con muy poca frecuencia a emisiones accidentales, puede resultar difícil precisar si el efecto es irreversible o si es posible una recuperación.

### Conclusiones generales

Los resultados de las evaluaciones comparativas de los riesgos de los diferentes sistemas energéticos utilizados para generar electricidad indican que, en condiciones de explotación normales, los sistemas de energía nuclear y energía renovable suelen encontrarse en el nivel más bajo de riesgo para la salud,

y que los sistemas energéticos basados en el carbón y el petróleo se encuentran en el más alto. Las variaciones en la magnitud del riesgo pueden acercarse a un factor de diez. Sin embargo, cuando todos los ciclos del combustible disponen de una tecnología moderna, pueden proporcionar electricidad con riesgos relativamente bajos para la salud y el medio ambiente. Las emisiones de CO<sub>2</sub> de los combustibles fósiles constituyen una excepción, y por tanto, su control ocupa un lugar prioritario en el actual programa de temas relativos a los efectos en el medio ambiente.

La evaluación comparativa de los riesgos desempeñará un papel cada vez más importante en la planificación energética, al brindar al personal directivo una información vital para formular las modalidades y combinaciones más adecuadas para la generación de electricidad. Entre las decisiones futuras en esta esfera se debe incluir, como cuestión prioritaria, la creación de una base de datos amplia y coordinada a nivel internacional sobre las repercusiones para la salud y el medio ambiente de las diferentes fuentes de energía.

### Tasa de mortalidad normalizada para los accidentes graves (1969-1986)

Opción energética	Nº de incidentes	Muertes inmediatas/ incidentes	Total de muertes inmediatas	Energía producida (GWa)	Mortalidad inmediata/energía (mortalidad/GWa)
<i>Carbón</i>					
Desastres en minas	62	10-434	3 600	10 000	0.34
<i>Petróleo</i>					
Hundimiento de buques petroleros	6	6-123	ND	21 000	—
Incendios en refinerías	15	5-145	450		0.02
Accidente durante el transporte	42	5-500	1 620		0.08
<i>Gas natural</i>					
Fuego/explosión	24	6-452	1 440	8 600	0.17
<i>Energía hidroeléctrica</i>	8	11-2 500	3 839	2 700	1.41
<i>Energía nuclear</i>	1	31	31	1 100	0.03

ND = no disponible

Observaciones: La estimación de la energía total producida a partir de combustibles fósiles se ha multiplicado por un factor de 0,35 para convertirla en un resultado equivalente de la energía eléctrica, y así poder compararla con la energía hidroeléctrica y nuclear.

La mortalidad informada se refiere a las muertes inmediatas; no se incluye la mortalidad tardía, de especial importancia para el accidente nuclear de Chernobil.

Fuente: Tomado de A.F. Fritzsche, "The Health Risks of Energy Production", Risk Analysis 9, No. 4 (1989).

Según cálculos aproximados, el riesgo para la salud humana que representan los accidentes graves ocurridos a causa de la energía nuclear, el petróleo y el gas natural son del mismo orden de magnitud, y dos órdenes de magnitud menos que el correspondiente a la opción hidroeléctrica. No obstante, para llegar a esa conclusión se deben tener en cuenta factores importantes: por ejemplo, el hecho de que en el ciclo de los combustibles fósiles no todos los accidentes se informan y que los accidentes en las centrales nucleares son menos numerosos, significa que los resultados tienen poca importancia estadística. No se incluyen las muertes tardías por cáncer provocadas por el accidente de Chernobil, ni los efectos tardíos de los accidentes no nucleares.