

Los siguientes artículos son una adaptación de memorias escogidas
basadas en comunicaciones presentadas por los participantes
en el Simposio sobre

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

celebrado en París del 24 al 26 de enero de 1980

Riesgos comparados de los diferentes sistemas energéticos: evolución de los métodos de estudio

por L.D. Hamilton

Esta conferencia ha puesto de relieve la dificultad de estimar los riesgos que para la salud se derivan de la energía, dificultad engendrada por las diferencias existentes entre las medidas *objetivas* del riesgo, el riesgo estimado o real de un proceso — y la percepción *subjetiva* de estos riesgos. La percepción subjetiva del riesgo influye muy a menudo en las ideas de quienes han de adoptar decisiones (también en los Gobiernos y en sus órganos de reglamentación), lo mismo que en el público. Esta confusión (independiente de los procesos psicológicos fundamentales que pueden intervenir) se explica como sigue:

1. Hasta la fecha, la evaluación de los riesgos derivados de los diferentes sistemas energéticos para la salud solo ha sido objeto de breves investigaciones escasamente dotadas, por ejemplo solo hace siete años que las agencias gubernamentales de los Estados Unidos empezaron a interesarse por la evaluación de tales efectos. Hace menos de siete años que se empezaron a financiar trabajos en Brookhaven.
2. La evaluación es cosa distinta de la investigación. Evaluar el costo, desde el punto de vista de la salud y el medio ambiente, de la producción y uso de energía, exige trabajos minuciosos

El Dr. Hamilton es jefe de la Biomedical and Environmental Assessment Division, Brookhaven National Laboratory (Estados Unidos).

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

en diversos campos. Hay que efectuar investigaciones para determinar los contaminantes emitidos en las diferentes etapas de los distintos ciclos del combustible, incluido el uso final, y detectar y seguidamente cuantificar sus transformaciones químicas y transporte, inclusive su evolución química y biológica a través del aire, el agua y los alimentos hasta llegar al hombre y a los animales y plantas importantes.

Para evaluar los daños causados por la contaminación se precisan estudios epidemiológicos sobre el hombre y las especies de valor económico. Igualmente, son necesarios laboratorios para dilucidar los mecanismos bioquímicos de los daños biológicos. Partiendo de estos estudios epidemiológicos y de mecanismos hay que deducir relaciones dosis-efecto razonables desde un punto de vista mecanicista, para que los evaluadores tengan funciones de dosis-daños utilizables. De esta manera una evaluación de los efectos para la salud y el medio ambiente es como una destilación que da lo esencial de los conocimientos en forma cuantitativa, juntamente con estimaciones de la incertidumbre, poniendo al mismo tiempo de manifiesto las esferas en que se desconoce todo sobre el costo, en el plano de la salud y ambiental, de la producción y utilización de energía.

La evaluación por sí sola no es una manera paulatina de producir información al día sobre los factores conocidos y desconocidos en la emisión de contaminantes por los ciclos del combustible, su transporte y transformación en el aire, agua, alimentos, etc., hasta llegar al hombre, y por tanto a los daños potenciales para la salud y el medio ambiente — lo que conduce a una tercera dificultad.

3. En una evaluación, debido al estado de los conocimientos (o a la falta de los mismos), a menudo hay que conformarse con un grado de confianza del 60%, en vez del 95% que uno procura conseguir con la investigación. Esta laguna estadística atrae a determinados grupos de intereses, por ejemplo a los Gobiernos y compañías eléctricas, que, desde el comienzo mismo de las evaluaciones comparadas, han explotado por una razón u otra la confusión entre la realidad y la percepción del riesgo.

La dificultad de distinguir entre el conocimiento de la realidad del riesgo y su percepción, es consecuencia del escaso tiempo dedicado a estudiar este asunto con seriedad, de la insuficiencia de las dotaciones, de la tardanza en comprender que una evaluación implica alguna incertidumbre, y que grupos con intereses especiales han sabido aprovecharse con audacia de la confusión en este problema. Las ideas tendenciosas del riesgo que tiene el público se deben mucho más a que son pocas las comparaciones sin móviles interesados de los efectos sobre la salud, y a su difusión insuficiente entre el público, que a rarezas psicológicas intrínsecas. Por desgracia lo que escribí en 1972 sigue siendo cierto hoy día:

“Se ha dado mucha importancia a la percepción de los daños por el público. Esto es muy cierto como prueba el enorme crecimiento de la mentalización del público ante los costos biológicos inherentes a la producción y utilización de energía y, en particular, al peligro de las radiaciones. Si bien hay pocas pruebas de que esta nueva mentalidad haya reducido la demanda de energía, está agravando las dificultades que tienen los órganos gubernamentales y las compañías eléctricas para aprobar y construir centrales que satisfagan esa demanda. El problema estriba en que no se han facilitado al público estimaciones claras de los riesgos y en que no abunda la información sobre los daños biológicos. Cuando se dispone de información cuantitativa, aunque sea con considerables reservas — como desde hace poco sucede con las radiaciones — se le ha dado una difusión insuficiente y ha sido mal entendida.”
Ref. [1].

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

ETAPA I: COMPARACION DE LOS DAÑOS PARA LA SALUD RESULTANTES DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ENERGETICOS

En la elaboración de métodos para comparar los daños para la salud de los diferentes sistemas energéticos, la Etapa I ha sido el enfoque parcial del ciclo del combustible: los daños para la salud causados por la producción de electricidad se han comparado con otros riesgos. Las radiaciones y la evaluación de los riesgos de una central nuclear constituyen un ejemplo clásico de este enfoque. La radiación, a diferencia de muchos contaminantes del medio ambiente, puede medirse con exactitud hasta dosis muy bajas. La radiación de fondo procedente de fuentes naturales (Cuadro 1) debe tenerse en cuenta al evaluar el riesgo de

Cuadro 1. Estimación de la dosis tisular absorbida anualmente proveniente de fuentes naturales en zonas "normales", Ref. [2]

Fuente de irradiación	Dosis tisular absorbida anualmente (mrad)			
	Gónadas	Pulmón	Células de revestimiento de los huesos	Médula ósea roja
Irradiación externa				
Rayos cósmicos:				
componente ionizante	28	28	28	28
componente neutrónico	0,35	0,35	0,35	0,35
Radiación terrestre: (γ)	32	32	32	32
Irradiación interna				
Radionucleidos cosmogénicos:				
$^3\text{H}(\beta)$	0,001	0,001	0,001	0,001
$^7\text{Be}(\gamma)$	—	0,002	—	—
$^{14}\text{C}(\beta)$	0,5	0,6	2,0	2,2
$^{22}\text{Na}(\beta+\gamma)$	0,02	0,02	0,02	0,02
Radionucleidos primordiales:				
$^{40}\text{K}(\beta+\gamma)$	15	17	15	27
$^{87}\text{Rb}(\beta)$	0,8	0,4	0,9	0,4
^{238}U - $^{234}\text{U}(\alpha)$	0,04	0,04	0,3	0,07
$^{230}\text{Th}(\alpha)$	0,004	0,04	0,8	0,05
^{226}Ra - $^{214}\text{Po}(\alpha)$	0,03	0,03	0,7	0,1
^{210}Pb - $^{210}\text{Po}(\alpha+\beta)$	0,6	0,3	3,4	0,9
^{222}Rn - $^{214}\text{Po}(\alpha)$ inhalación	0,2	30	0,3	0,3
$^{232}\text{Th}(\alpha)$	0,004	0,04	0,7	0,04
^{228}Ra - $^{208}\text{Tl}(\alpha)$	0,06	0,06	1,1	0,2
^{220}Rn - $^{208}\text{Tl}(\alpha)$ inhalación	0,008	4	0,1	0,1
Total (redondeado)	78	110	86	92
Fracción de la dosis absorbida causada por partículas alfa o neutrones (%)				
	1,2	31	8,5	2,1

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 2. Dosis probable procedente de una central nuclear (Ref. [3]).

	mrem/a
En el perímetro de la central	5
Población en un radio de 6 millas a partir de la central	0,6
Comiendo 50 g/día de pescado y mariscos capturados a la salida del canal de descarga del condensador	2,5
Nadando 3 h/día, 120 días/año, en el canal de descarga del efluente del condensador	0,03
Nadando 3 h/día, 120 días/año, en zonas costeras situadas a cualquier lado de la central nuclear	0,006
Promedio de la radiación de fondo en los Estados Unidos	105

Nota: Dosis en todo el cuerpo probables cuasadas por una central nuclear: dosis calculadas para Millstone Point, Connecticut — central de dos reactores de unos 1300 MW(e) — ubicada en la costa norte de Long Island Sound. Las dosis en el perímetro de la central y a la población en un radio de 6 millas son las acumuladas por personas que permanezcan 24 horas/día y 365 días/año en el perímetro o al aire libre en un radio de 6 millas a partir de la central.

daño que resultará de una fuente adicional. Una fuente adicional de radiación de ámbito mundial son, por ejemplo, las precipitaciones resultantes de los ensayos nucleares. Las dosis que acumularán hasta el año 2000 los tejidos vulnerables debido a todos los ensayos nucleares efectuados antes de 1971 — los compromisos de dosis — se pueden comparar con las originadas por la radiación natural. Son más o menos equivalentes a las producidas por dicha radiación natural en dos años.

El Cuadro 2 indica la dosis probable en todo el cuerpo causada por una central nuclear típica en un litoral. En los Estados Unidos la dosis en el perímetro de las centrales nucleares está ahora limitada a un máximo de 5 mrem/año*. Como las centrales nucleares son fuentes puntuales de radiación, esto limita la dosis a la población en un radio de 6 millas a partir de las centrales nucleares a ~0,6 mrem/año y, en un radio de 50 millas, a ~0,01 mrem/año.

Suponiendo que la relación lineal entre la dosis de radiación y la inducción de tumores, observada para las dosis y tasas de dosis elevadas, es extrapolable a las dosis minúsculas que emitirían a tasas también muy bajas las centrales nucleares, es posible calcular el número de cánceres probables en una población por exposición a las radiaciones. Estas estimaciones de riesgo pueden entonces compararse con otras causas de muerte. El Cuadro 3 indica que el riesgo de muerte accidental por individuo y año es de 57 en 100 000; de muerte en un vehículo de motor, de 26,7 en 100 000; de muerte por enfermedad cardiaca, de 364 en 100 000; de muerte por cáncer, de 157 en 100 000; de muerte por todas las leucemias espontáneas, de 67 en 1 000 000**.

* Apéndice 1 del Capítulo 10 del Code of Federal Regulation, Parte 50, referente a la concesión de licencias a centrales nucleares.

** Estas cifras proceden del "Statistical Abstract of the United States of America" de 1970.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 3. Riesgo de muerte por año para un individuo (Ref. [3]).

		Riesgo	Probabilidad
Muerte accidental	57	entre 100 000	0,00057
Muerte en un vehículo de motor	26,7	entre 100 000	0,00027
Muerte por enfermedad cardiaca	364	entre 100 000	0,00364
Muerte por cáncer	157	entre 100 000	0,00157
Muerte por todas las leucemias espontáneas	67	entre 1 millón	0,000067
Leucemia tras una ICT* de 1000 mrem	1	entre 1 millón	0,000001
Leucemia por efecto de la radiación natural (35 años)	3,7	entre 1 millón	0,0000037
Leucemia por efecto de los reactores de potencia (35 años en el perímetro, consumiendo pescado y nadando)	2,6	entre 10 millones	0,00000026
Leucemia por efecto de los reactores de potencia (35 años — población en general situada en un radio de 6 millas a partir de la central)	2,1	entre 100 millones	0,000000021

Nota: Riesgo de muerte por año para un individuo en los Estados Unidos (datos tomados del "Statistical Abstract of the United States" de 1970). Los riesgos de leucemia, que figuran debajo de la línea, son riesgos adicionales al de muerte por todas las leucemias espontáneas. De modo análogo, el riesgo de muerte por todos los cánceres adicionales sería alrededor de cinco veces el de cáncer (157 en 100 000).

* Irradiación corporal total.

Como se ve por este cuadro, el riesgo de muerte provocada por un automóvil es 1 000 veces mayor que el de muerte por leucemia, en el caso de límites máximos de exposición durante 35 años a las radiaciones de una central nuclear. Después de 35 años de exposición, el riesgo de muerte por leucemia, en las condiciones medias de la población situada en un radio de 6 millas a partir de la central, es decir, la que corre más peligro, es una dieziléscima del de muerte causada por un automóvil, es decir, al cabo de 35 años las probabilidades de morir a causa de un vehículo de motor sería 350 000 veces mayores que las de muerte por leucemia. Como la inducción total de tumores por las radiaciones es ~5 veces mayor que la incidencia de la leucemia, el riesgo total de muerte por cáncer a estas dosis sigue siendo infinitesimal. Además, incluso si se admite que un feto puede ser unas 10 veces más sensible a los efectos oncogénicos de las radiaciones que un individuo medio de la población, cabe recordar que el feto permanece normalmente en el útero menos de un año. Por tanto, el riesgo para el feto será ~1/3 del calculado para la población general expuesta durante 35 años.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

ETAPA II. ENFOQUE DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NORMALIZADO PARA UNA CENTRAL DE 1000 MW(e) AÑO.

La siguiente innovación en los métodos para comparar los efectos de las distintas fuentes energéticas sobre la salud fue el enfoque del ciclo del combustible normalizado para una unidad de producción o una tasa de producción típica de 1000 MW(e) central año.

La mayoría de las actividades para la generación y utilización de energía entrañan costos peculiares de tipo biomédico, ambiental y de otra índole, unos directos (por ejemplo, riesgos de lesión o de muerte en minería) y otros indirectos (por ejemplo, emisión de contaminantes a la atmósfera, al agua, a las cadenas alimentarias, etc). Para comparar los efectos sobre la salud de tecnologías que producen la misma forma de energía, por ejemplo, electricidad, puede utilizarse una unidad normalizada de producción. Cuando se consideran tecnologías que producen diferentes formas de energía, por ejemplo, la electricidad a partir del carbón frente a la gasificación del carbón o a la licuefacción del carbón, no es siempre fácil una comparación cuantitativa. En efecto, es posible que no exista una base totalmente satisfactoria. Unos caudales de electricidad, gas o petróleo que tengan el mismo contenido energético no son realmente iguales: el consumidor los utiliza con distinto rendimiento y a menudo con distintos objetivos. Pero esta dificultad puede sortearse en gran medida examinando las

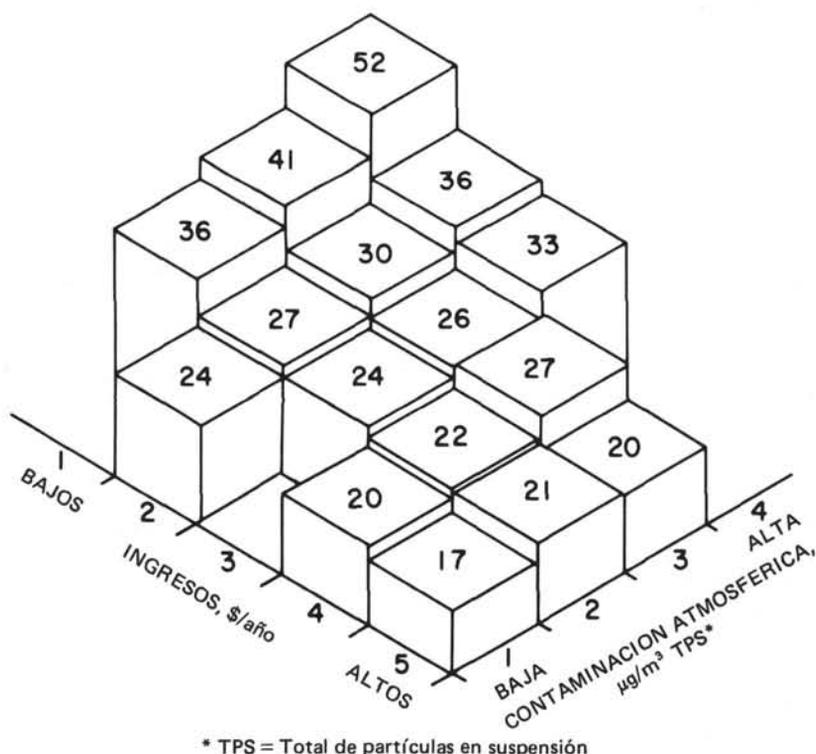


Figura 1. Tasa de mortalidad, muertes/1000/año, varones de 50 a 69 años. (Ref. [6]).

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

diferentes opciones tecnológicas en el seno de un sistema energético global que satisfaga todas las demandas.

Al analizar los efectos del ciclo del combustible fósil sobre la salud, la incertidumbre mayor radicaba en la relación entre la contaminación atmosférica por combustión de combustibles fósiles y la mala salud, Ref. [4]. La Biomedical and Environmental Assessment Division (BEAD) de Brookhaven se propuso evaluar los daños para la salud debidos a la contaminación atmosférica por quema de combustibles fósiles de dos maneras, (Ref. [5]). En primer lugar, hicimos un nuevo análisis completo de los datos publicados en la literatura sobre la asociación entre la contaminación del aire y la mala salud. En segundo lugar, organizamos de nuevo los datos brutos sobre mortalidad, contaminación y económicos y realizamos un análisis cuantitativo independiente del vínculo entre la quema de combustibles fósiles, la contaminación atmosférica y la mala salud.

Nuevo análisis de los datos de Winkelstein

Winkelstein y colaboradores en la Universidad del Estado de Nueva York (Buffalo), y más adelante en la Universidad de California (Berkeley), estudiaron detenidamente los efectos de la contaminación atmosférica, TPS (total de partículas en suspensión), sobre la mortalidad en Buffalo entre 1959 y 1961, Ref. [6]. Limitaron su estudio a hombres y mujeres blancos de más de 50 años. Cada sector censal (una zona constituida por unas diez manzanas) de Buffalo se incluyó en uno de los 20 grupos establecidos atendiendo al nivel medio de contaminación y a la mediana de los ingresos familiares de ese sector. Se examinaron el nivel de educación, la profesión y el alojamiento como posibles factores contribuyentes y los daños. Para cada nivel económico, las áreas con una mayor contaminación dieron una mortalidad notablemente más elevada (Fig. 1).

Winkelstein estimó que los datos no eran lo bastante buenos para justificar un análisis más a fondo. Los que tienen que tomar decisiones necesitan la evaluación inmediatamente; una decisión demorada puede ser costosa; a menudo una decisión no puede retrasarse. Con fines de evaluación inmediata, la Biomedical and Environmental Assessment Division efectuó, pues, un análisis más detenido de los datos de Buffalo para validar determinadas comparaciones de los resultados de varios estudios sobre contaminación atmosférica, Ref. [7]. Se hizo un análisis estadístico por regresión múltiple. Para ello fue necesario especificar el nivel de contaminación y de ingresos de cada grupo de sectores censales.

Los investigadores de Brookhaven adoptaron el punto medio de los intervalos que definían los grupos de contaminación y de ingresos como medida de la contaminación y de los ingresos. Efectuaron ajustes indirectos de la edad (Cuadro 4), dentro de los grandes grupos por edades de Winkelstein, a fin de eliminar la posibilidad de que los daños observados se debiesen a diferencias en la estructura de edades. El análisis reveló que la correlación entre las tasas de mortalidad y el nivel de contaminación atmosférica y el nivel económico era más estrecha de lo que podría atribuirse al azar. Al aumentar la mediana de los ingresos se observaba una disminución de las tasas de mortalidad (Cuadro 4). La ecuación ajustada fue:

$$SMR = 0,51 + (0,6 \pm 0,08) E + (0,007 \pm 0,001) P$$

donde:

SMR = razón de la tasa observada de mortalidad a la tasa de mortalidad que hubiese existido de regir los valores medios correspondientes a los Estados Unidos;

E = 10 000/ingresos familiares; y

P = total de partículas en suspensión, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 4. Razones de mortalidad ajustadas indirectamente, basadas en datos de Winkelstein; se aprecia el crecimiento de las mismas al aumentar la contaminación, y su disminución al aumentar los ingresos, en el caso de hombres y mujeres blancos, (Ref. [7]).

Grupos, según la mediana creciente de los ingresos familiares	Nivel de la contaminación por partículas — Contaminación creciente			
	(1)	(2)	(3)	(4)
	— Buffalo, hombres blancos de 50 a 69 años (1959—1961)			
(1)	—	1,57	1,67	2,11
(2)	1,03	1,15	1,28	1,53
(3)	—	1,04	1,17	1,43
(4)	0,89	0,98	1,19	—
(5)	0,79	0,94	0,94	—
	— Buffalo, mujeres blancas de 50 a 69 años (1959—1961)			
(1)	—	1,13	1,40	2,34
(2)	0,92	0,97	1,29	1,49
(3)	—	0,98	1,24	1,39
(4)	1,04	0,84	1,15	—
(5)	0,88	0,92	0,69	—

Como la tasa básica de mortalidad resultante de los datos de Buffalo era de 200 muertes por 10^4 (hombres y mujeres de 50 a 69 años), el efecto de un aumento del TPS en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre la mortalidad total en este grupo es de $200 \times 0,007 = 1,4$ muertes por 10^4 . Los intervalos de confianza del 95% para esta estimación van de 1,0 a 1,8. Para analizar los datos de Buffalo se utilizó también un modelo no lineal, Ref. [7].

Nuevo análisis de los datos de Lave-Seskin

Lave y Seskin, economistas de la Universidad Carnegie-Mellon, recurrieron a la regresión múltiple para estudiar la relación entre las tasas de mortalidad en grandes ciudades, según Standard Metropolitan Statistical Areas (SMSAs) de los Estados Unidos, y los niveles de contaminación, la distribución por edades y las variables socioeconómicas. Sus factores de representatividad fueron óptimos. Considerando solo el incremento medio de los sulfatos, estimaron que el daño asociado con dicho incremento al crecer la contaminación atmosférica por sulfatos era:

$$MR = 3,3 (\Delta \text{med. SO}_4)$$

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

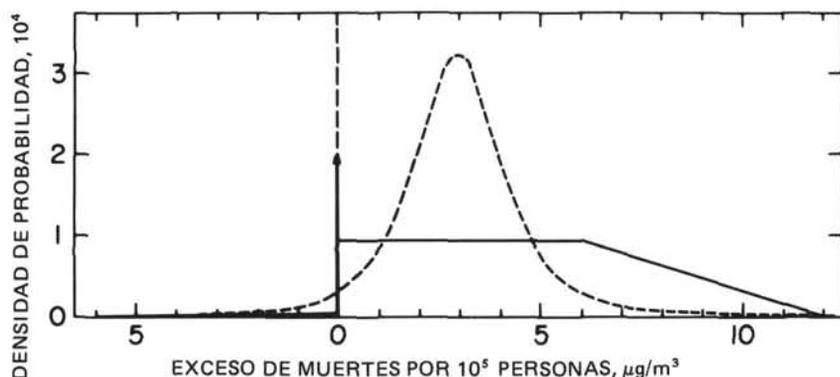


Figura 2. Funciones de densidad de probabilidad BEAD que representan la incertidumbre acerca de la pendiente de la función lineal de daños supuesta. La curva de trazo continuo es la distribución subjetiva. La de trazo discontinuo es la estimación clásica (distribución de Student, t, con tres grados de libertad), obtenida tratando los resultados de cuatro estudios de regresión como observaciones independientes de la misma pendiente, Ref. [8].

donde:

MR = tasa de mortalidad;

Δ med. = variación con respecto al nivel medio.

El efecto de los sulfatos aplicado fue, pues:

3.3 muertes/año/ 10^5 por cada $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento de los sulfatos, (Ref. [7]).

Análisis probabilista BEAD

A fin de agrupar todas las incertidumbres inherentes a esta relación cuantitativa entre la explotación de una central alimentada con carbón y los daños para la salud, Morgan y Morris realizaron un análisis probabilista detallado, Ref. [8]. Basándose en una central de 1000 MW(e) alimentada con carbón, elaboraron un modelo para la contaminación atmosférica por el azufre, el transporte, la dispersión, a las consecuencias para la población situada en un radio de 80 km. Utilizaron un modelo gaussiano de dispersión del penacho, con un enfoque lineal de la química del azufre y una función lineal de los daños para la salud. Los aspectos importantes del modelo que implicaban incertidumbre fueron; fracción de azufre emitida en forma de SO_4 , tasa de pérdidas de SO_2 , tasa de pérdidas de SO_4 , tasa de transformación de SO_2 en SO_4 , función de daños para la salud y modelo meteorológico. Caracterizaron la incertidumbre de cada una de estas variables mediante una función de densidad de probabilidad basada en razonamientos científicos existentes. Así se obtiene no solo la "estimación" sino además la probabilidad de que el valor real de una variable pueda ser mayor o menor que la "estimación". En esencia, estas distribuciones definen las probabilidades que estimaría tener un científico experimentado si se le pidiese que apostase sobre el resultado de una serie de experimentos concretos para determinar, en un momento futuro, el verdadero valor de las variables. Estas funciones de densidad de probabilidad (fdp) se combinaron a continuación en un análisis de simulación para obtener estimaciones de la exposición de la población, las muertes prematuras (Fig. 2), y los años-persona perdidos.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

La caracterización de la incertidumbre en la forma fdp, basándose en los mejores razonamientos científicos existentes, tiene varias ventajas frente al uso de los métodos estadísticos clásicos fundados en los datos disponibles:

1. Con frecuencia los mejores datos proceden de estudios que adolecen — a menudo inevitablemente — de graves defectos, por ejemplo, problemas de concepción, variables no consideradas, etc. Con los métodos estadísticos clásicos no se pueden interpretar claramente los resultados de estos estudios.
2. Los datos disponibles se basan corrientemente en un subconjunto del universo posible total, que puede no ser representativo, por ejemplo, estudios epidemiológicos de ciertos subgrupos de población, estudios de la química del aire los días en que un aeroplano puede volar, etc.
3. La necesidad de combinar los resultados de varios tipos de estudios, por ejemplo, tener en cuenta estudios de laboratorio así como los realizados en el "mundo real". La extrapolación a partir de resultados de laboratorio exige más de lo que la estadística clásica puede dar.

¿Qué incertidumbres importantes quedaron sin cuantificar? Se supusieron conocidos el modelo en sí y la forma de los parámetros. Ambos pueden ser totalmente diferentes de los supuestos. Este punto no fue tratado explícitamente e introduce una incertidumbre aparte de las caracterizadas. Por ejemplo, se supone una función lineal de daños y no se considera la incertidumbre debida a la posibilidad de que esta función tenga otra forma.

Definición de la función de daños para la salud

La función de daños para la salud aplicada relaciona la exposición anual media a los sulfatos con el aumento de la tasa anual de mortalidad. No representa efectos agudos episódicos sino las consecuencias a largo plazo, para la población, de una exposición ambiental continua. Aunque se desconoce la sucesión de hechos que causa estos efectos en la población, la exposición a largo plazo a la contaminación atmosférica, en particular durante la niñez, es probable que aumente la susceptibilidad a infecciones respiratorias. Un historial de infecciones respiratorias repetidas, posiblemente combinadas con una exposición continua a la contaminación atmosférica, aumenta la frecuencia de las enfermedades respiratorias crónicas. Esto significa más muertes causadas por una amplia gama de enfermedades cardiopulmonares. Así pues, una mayor exposición a la contaminación atmosférica degrada la salud de la población; esto en definitiva se refleja en la tasa de mortalidad. Las muertes atribuibles a una exposición a la contaminación atmosférica en un año dado no ocurren necesariamente ese mismo año, sino que se distribuyen durante toda la vida de la población expuesta. No estamos todavía en condiciones de estimar la distribución de estas muertes en el tiempo. Las estimaciones de la mortalidad no solo representan muertes prematuras, sino años de función respiratoria disminuida, de incapacidad tal vez antes de la muerte. Puesto que posiblemente no todas las enfermedades respiratorias inducidas originen una muerte prematura, la incidencia anual de nuevos casos de enfermedad es sin duda alguna más elevada que el número anual de muertes. Como la función de daños para la salud se basa en tasas anuales de mortalidad, cada muerte atribuida a la contaminación atmosférica representa como mínimo un año de vida perdido. Estimaciones razonables de la distribución por edades de las muertes permiten concluir que son probables de 5 a 15 años perdidos por muerte atribuida.

En condiciones estacionarias, las muertes que ocurran en los años futuros atribuibles a la exposición a la contaminación en este año son iguales al número de muertes que ocurran en este año provocadas por la suma de la exposición a la contaminación en todos los años

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

precedentes. En parte sobre esta base, se dedujo una función lineal de daños para la salud partiendo de estudios de representatividad, que se utilizó como método simplificado para estimar los efectos de distintas estrategias energéticas. Según esta función lineal simplificada de daños, el incremento de la exposición a sulfatos un año dado aumenta inevitablemente los daños para la salud y las muertes prematuras. El incremento de tales daños es proporcional al incremento de la exposición a sulfatos y es independiente de la exposición total a sulfatos en el supuesto lineal. Estas muertes prematuras estimadas pueden compararse con el total de muertes anuales en la población expuesta; esto da perspectiva a las estimaciones. Esta fracción podría considerarse como una estimación aproximada de la contaminación atmosférica de este nivel; no es la fracción de las muertes totales atribuibles a este nivel de exposición que ocurren en el mismo año.

Parece dudoso que la función de daños sea verdaderamente lineal y no presente un umbral en toda la gama de exposiciones. A niveles absolutos bajos de exposición, es más probable que disminuyan las consecuencias para la salud resultantes del incremento de los sulfatos en una ciudad. Es posible que haya un umbral por debajo del cual no se produzcan daños detectables para la salud. Los datos en los que se basa la función dosis-respuesta proceden de zonas urbanas con un nivel de fondo de sulfatos generalmente elevado, pero, y esto es significativo, la función lineal es compatible con los datos procedentes de zonas urbanas y rurales, es decir, de niveles elevados y bajos de contaminación. Parece razonable adoptar una función lineal para estimar los efectos de pequeñas variaciones del nivel de sulfatos en las zonas cuyos niveles de fondo sean elevados. La estimación de los efectos de grandes variaciones de los niveles de fondo, o de pequeñas variaciones en zonas con bajos niveles iniciales de fondo, acrecienta la incertidumbre en la estimación de los daños.

La función de daños para la salud expuesta por Morgan y Morris supone de 0 a 12 muertes/10⁵ por año y $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de sulfatos, con una mediana de 3,7 (y un intervalo de confianza del 95% que va de 0 a 11,5). Estas estimaciones se obtuvieron analizando datos procedentes sobre todo de estudios de correlación como los realizados por Lave y Seskin, y presentan muchos problemas metodológicos y de datos, examinados en detalle en otras publicaciones. Estos estudios son, por sí solos, insuficientes para atribuir los efectos observados a la contaminación atmosférica por sulfatos. En cambio, juntamente con trabajos toxicológicos y epidemiológicos constituyen un método útil de estimar la magnitud de los daños.

Análisis de la contaminación atmosférica y la mala salud, realizado por BEAD

Al mismo tiempo que efectuábamos un nuevo análisis de los datos publicados en la literatura sobre la relación entre la contaminación atmosférica y la mala salud, elaboramos nuestra propia base de datos con esa finalidad. Esta abarca los registros totales de mortalidad de los Estados Unidos para 1969, 1970 y 1971 procedentes del National Center for Health Statistics. En él se registran alrededor de 2 millones de muertes por año; se trata, pues, de un análisis de 6 millones de muertes, correspondientes al total de los 3 141 condados de los Estados Unidos, frente al número mucho menor de muertes de Standard Metropolitan Statistical Areas (SMSA) (utilizado en el estudio de Lave y Seskin). Además — a diferencia también de los estudios SMSA — nuestros datos incluyen todas las zonas urbanas y rurales de los Estados Unidos. Hemos empleado también los datos del censo de 1970 como fuente de algunas variables socioeconómicas, especialmente los ingresos. Como se consideran todas las muertes ocurridas en los Estados Unidos en tres años, y se estudian las personas expuestas a una gama más amplia de contaminación atmosférica, se puede tener mucha más confianza en el significado de los efectos observados.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

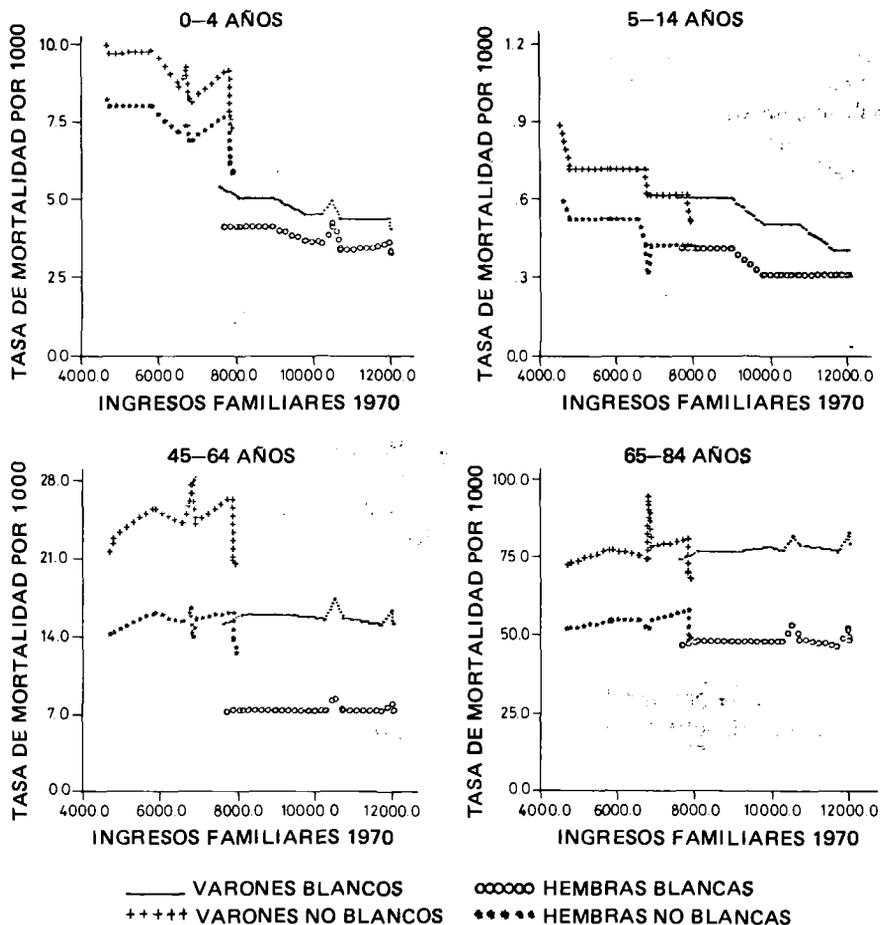


Figura 3. Tasas de mortalidad específicas según la edad, raza, sexo e ingresos familiares, 1970.

Utilizando estos datos sobre la relación entre contaminación atmosférica y efectos para la salud hemos realizado nuestro análisis en tres etapas.

– Etapa 1. Los 3141 condados que en total forman los Estados Unidos se clasificaron en 192 grupos, según 17 niveles de ingresos de censo de 1970, y 21 niveles de contaminación, expresados en forma de emisiones por milla cuadrada. Las variables “ingresos” se representaron por las medianas de los ingresos familiares, específicos según la raza, resultantes del censo de 1970. Al correlacionar la contaminación atmosférica con los efectos sobre la salud, el ideal sería conocer la dosis real a que la población estuvo expuesta. Por desgracia, no se conoce la dosis de contaminación atmosférica a la población; Lave y Seskin, y otros especialistas, han utilizado datos sobre la calidad del aire (concentración de contaminantes/m³) como sustitutivo de la dosis. Por su carácter incompleto, los datos sobre la calidad del aire

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

son poco útiles inicialmente para un estudio nacional sobre los daños para la salud provocados por la contaminación atmosférica. Por tanto, en esta etapa de nuestro análisis hemos utilizado emisiones estimadas en lugar de dosis. Esta variable varía en cinco órdenes de magnitud entre las regiones urbanas y rurales de los Estados Unidos. Por tanto, la variable "contaminación" se representó por el logaritmo decimal de las emisiones calculadas de azufre (SO_x) en toneladas por milla cuadrada para 1970. Hemos preferido la transformación logarítmica de la emisión por poseer una distribución más normal que las estimaciones brutas.

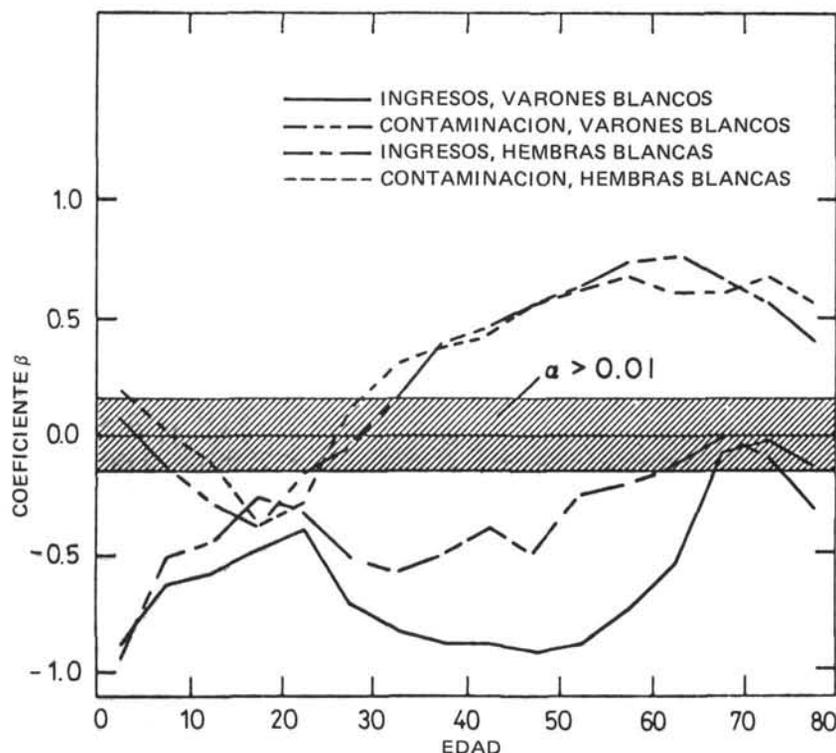
La variable mortalidad se representó por tasas de mortalidad específicas según la causa, sexo, raza y edad para 1969–1971. Las técnicas estadísticas de multivariantes aplicadas (regresión múltiple y análisis de recorridos) permitieron estimaciones claras de las relaciones del nivel de ingresos y la contaminación con la mortalidad. Los efectos de la contaminación y los ingresos se observaron por intervalos de edad, pues así era posible computar las relaciones específicas según el sexo, raza y edad, que permiten abordar la cuestión del costo en términos de reducción de la vida — y no sencillamente del total de muertes atribuibles, Ref. [9].

La Fig. 3 muestra una particularidad muy destacada en el análisis de la relación de los ingresos familiares con la mortalidad, Ref. [10]. El promedio de los ingresos familiares de los no blancos en los 3141 condados es inferior al de los blancos. Por ello hemos procurado calcular la función de daños basándonos en los datos relativos a las personas de raza blanca únicamente. No es posible incluir a los no blancos: es abrumadora la influencia de sus ingresos sobre la mortalidad. En los grupos de edad correspondientes a 0–4, 5–14 así como 45–64 años se observa un pronunciado efecto de los ingresos familiares sobre la tasa de mortalidad, con una notable diferencia según el sexo en todos los grupos de edad, tanto para los no blancos como para los blancos. En el grupo de edad correspondiente a 65–84 años, como era de esperar, el efecto de los ingresos se ha nivelado, aunque todavía son evidentes las diferencias entre las tasas de varones y hembras.

La Figura 4 indica la relación de los ingresos y la contaminación con la mortalidad para varones y hembras blancos de todas las edades. En el eje X se representan los puntos medios de intervalos de edad de cinco años. En el eje Y los valores del coeficiente beta correspondientes a los ingresos y la contaminación como medios para pronosticar la mortalidad. El coeficiente beta — un coeficiente de regresión normalizado en una ecuación de regresión múltiple — cuantifica la intensidad de la relación entre la mortalidad en cada edad y la variable indicada (ingresos o contaminación). Un coeficiente positivo significa que un aumento de la variable va acompañado de un aumento de la mortalidad en esa edad, mientras que un coeficiente negativo indica que al aumentar la variable disminuye la mortalidad en esa edad. Los valores próximos a 1, o a -1, representan típicamente una fuerte asociación (el coeficiente beta puede ser mayor que el valor absoluto, de modo que no cabe interpretarlo como coeficiente de correlación). La zona rayada indica la región en que el coeficiente no es estadísticamente distinto de 0, Ref. [11].

En general los ingresos tienden a estar asociados negativamente con la mortalidad al aumentar la edad. Esto se manifiesta en particular para los varones blancos, en los que los ingresos constituyen — y de hecho mejoran — la protección contra la mortalidad al crecer la edad. Para ambos sexos, la contaminación se asocia más claramente con la mortalidad a medida que la edad avanza. La única excepción es el grupo de edad 0–4, en el que se sospecha una asociación positiva con la contaminación. Este resultado sugiere que la contaminación puede ser especialmente perjudicial para los niños, como resulta de su mortalidad, y de la de personas muy jóvenes. Se precisan más investigaciones.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS



Nota: Los puntos representados son las centrales de cada intervalo de edad de 5 años.

Figura 4. Efectos combinados de los ingresos y la contaminación según la edad, para varones y hembras blancos, mortalidad total.

La comparación de nuestro exceso calculado de muertes con otros trabajos presenta analogías sorprendentes, Ref. [10]. Winkelstein y otros, Ref. [6], calcularon un valor aproximado de 14 muertes/100 000/ $\mu\text{g TPS}^*/\text{m}^3$. Lave y Seskin, Ref. [12], obtuvieron estimaciones de un orden de magnitud más bajas, de 0,9 muertes/100 000/ $\mu\text{g TPS}^*/\text{m}^3$ para los varones blancos de edad comprendida entre 55 y 74 años. Como ambas estimaciones se basan en la medida del TPS y no del SO_4 , para compararlas hubo que efectuar ciertas transformaciones en nuestros datos. El problema de la equivalencia de la contaminación es difícil. Recientes estudios han indicado que la proporción de SO_4 en el TPS varía ampliamente, Refs [13 y 14]. Suponiendo que un intervalo razonable de conversión es el de 25 a 80%, podemos transformar nuestras estimaciones del exceso de muertes en cifras comparables con las de Winkelstein, y Lave y Seskin. Siguiendo un enfoque totalmente distinto, Morgan y otros, Ref. [8], han calculado también el exceso de muertes, pero como sus estimaciones se basan en la medida de la contaminación por SO_4 , no ha sido necesaria más modificación que diferenciar entre la proporción relativa de SO_2 y SO_4 en SO_x . El Cuadro 5 presenta una versión modificada de la comparación del exceso de muertes efectuada por Finch y Morris, Ref. [7].

* Total de partículas en suspensión.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 5. Comparación de las estimaciones de muertes atribuibles a la contaminación, efectuadas por varios investigadores

Investigadores	Exceso de muertes (muerte por $10^5/\mu\text{g}/$ tipo de contaminante en m^3)	Límites de confianza del 95%	
		Mínimo	Máximo
Winkelstein (1967)* varones y hembras blancos de 50 a 69 años ($\mu\text{g}/\text{TPS}/\text{m}^3$)	14,00	10,00	18,00
Bozzo y otros varones y hembras blancos de 50 a 69 años Supuesto: 25% de SO_4/TPS	2,29	0,91	3,67
80% de SO_4/TPS	7,34	2,91	11,76
Lave y Seskin (1977)** varones y hembras blancos de 45 a 64 años ($\mu\text{g}/\text{TPS}/\text{m}^3$)	0,90	0,40	1,40
Lave y Seskin (1977) varones blancos de 45 a 64 años ($\mu\text{g SO}_4/\text{m}^3$)	4,41	-5,80	14,60
hembras blancas de 45 a 64 años ($\mu\text{g SO}_4/\text{m}^3$)	8,10	2,20	14,00
Bozzo y otros varones y hembras blancos de 45 a 64 años Supuesto: 25% SO_4/TPS	1,68	0,68	2,69
80% SO_4/TPS	5,38	2,16	8,59
Lave y Seskin (1977) Todas las edades, varones blancos	4,80	-0,50	10,10
Todas las edades, hembras blancas	9,35	4,50	14,20
Morgan y otros (1977) Todas las edades ($\mu\text{g SO}_4/\text{m}^3$)	3,71***	0,00	11,47
Bozzo y otros (1977) Todas las edades ($\mu\text{g SO}_4/\text{m}^3$)	3,56	1,16	5,96

* Valor calculado por Finch y Morris a partir de datos de Winkelstein.

** Comunicación personal a S. Finch (en Finch y Morris, Ref. [7]).

*** Valor de la mediana.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

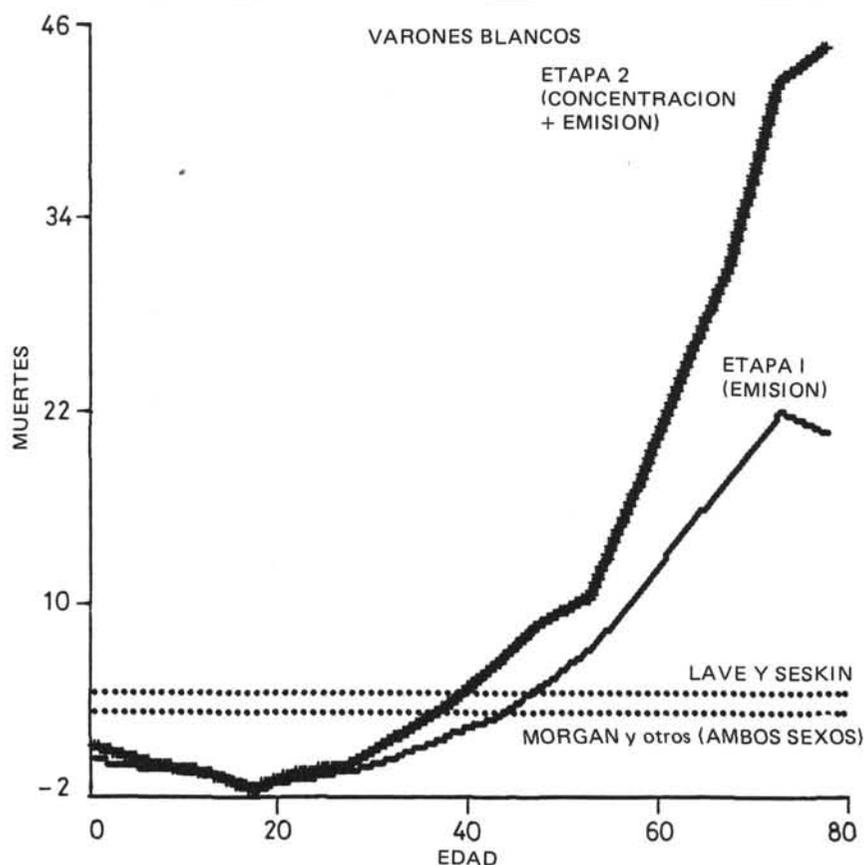


Figura 5. Total de muertes asociadas con la exposición a SO_4 (muertes/100 000/ $\mu g/SO_4/año$, varones blancos de los Estados Unidos, 1969–1971. [Etapa I: Análisis basado en datos sobre las emisiones. Etapa II. Análisis basado en la calidad del aire y datos conexos sobre las emisiones. Obsérvense los valores medios facilitados por Lave y Seskin y los resultados del estudio probabilista efectuado por Morgan y otros para ambos sexos y todas las edades.]

— **Etapa II:** Como las emisiones no son un criterio ideal para la calidad del aire, en la Etapa II de nuestro análisis hemos utilizado los datos sobre la calidad del aire disponibles en 1970, dados por 248 estaciones de medición de la calidad del aire de la EPA** para tres especies de contaminantes: SO_2 , SO_4 y total de partículas en suspensión (TPS). Como hemos señalado ya, estas 248 estaciones de medición no abarcan ni con mucho los 3141 condados de los Estados Unidos — el condado es la unidad utilizada en la Etapa I de nuestro análisis; si bien las principales zonas urbanas poseen una o más estaciones de medición, las rurales son controladas de modo somero. A fin de soslayar tal dificultad, esto es que en 1970 solo 221 condados poseían una o más estaciones de medición de la calidad del aire, de la EPA,

** Environmental Protection Agency (Agencia para la Protección del Medio Ambiente).

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

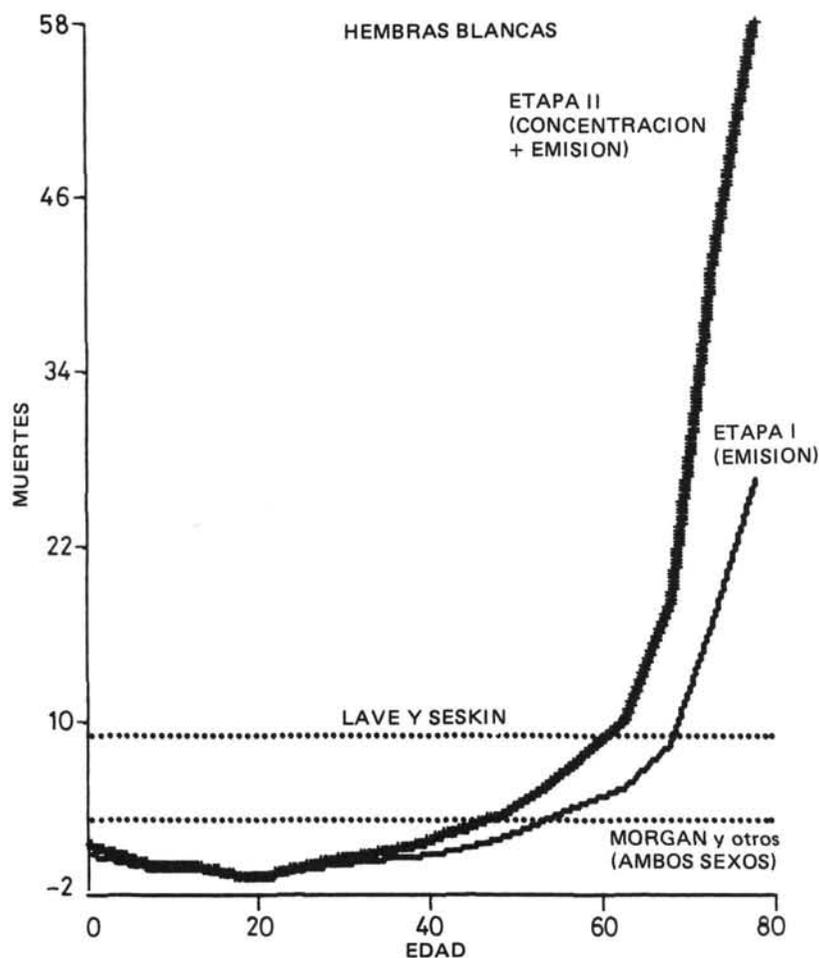


Figura 6. Total de muertes asociadas con la exposición a SO_4 (muertes/100 000/ $\mu g/SO_4/año$, hembras de los Estados Unidos, 1969–1971. Etapa I, Etapa II: Ibid. Fig. 5. Obsérvense los valores medios dados por Lave y Seskin y los resultados del estudio probabilista efectuado por Morgan y otros, para ambos sexos y todas las edades.

hemos supuesto que cada una de esas estaciones permite estimar satisfactoriamente el nivel de contaminación de todos los condados que tienen emisiones y características socioeconómicas análogas. A tal efecto hemos usado los 192 grupos iniciales de la primera etapa de nuestro análisis con objeto de obtener un conjunto de datos que abarque una población de magnitud suficiente para poder calcular tasas de mortalidad estadísticamente significativas, Ref. [15].

De estos 192 grupos iniciales, 92 grupos de condados tenían como mínimo una estación de medición de la EPA. En 44 de estos 92 grupos, el 50% o más de la población reside en

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

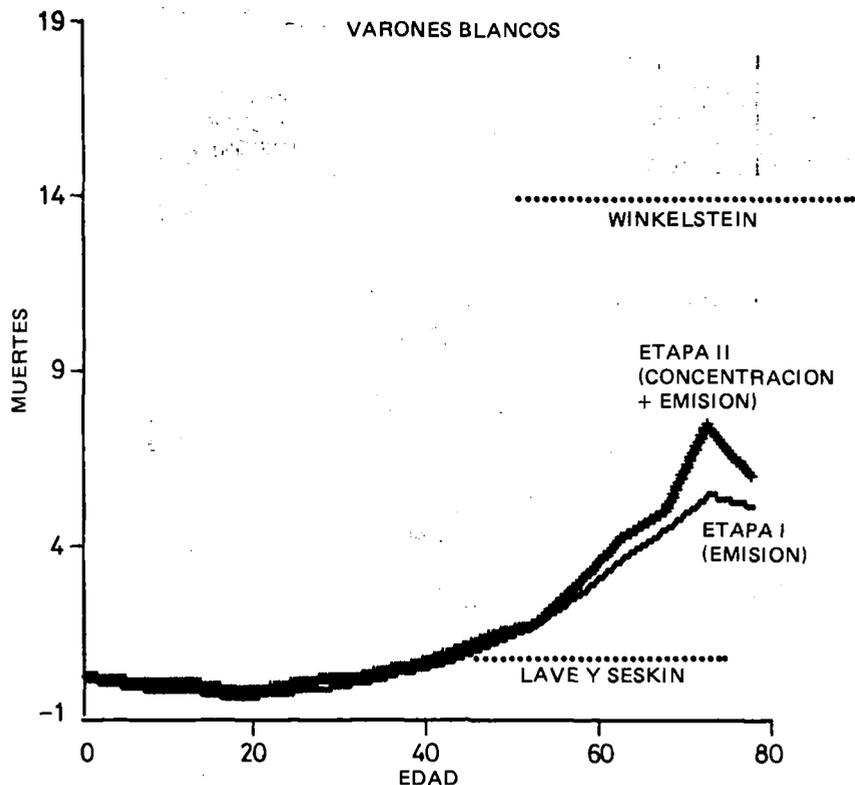


Figura 7. Total de muertes asociadas con la exposición al total de partículas en suspensión (muertes/100 000/ $\mu\text{g}/\text{TPS}/\text{año}$, para varones blancos de los Estados Unidos, 1969 a 1971. Etapa I, Etapa II: *Ibid.*, Fig. 5. A los fines de comparación, obsérvense los valores dados por Winkelstein para la edad de 50 a 69 años, y por Lave y Seskin para la edad de 45 a 64 años.

condados que tienen una o más estaciones de medición. Por desgracia, estos 44 grupos son más representativos de las zonas urbanas contaminadas en los Estados Unidos y hay que obrar con precaución al extrapolar estos resultados a las poblaciones rurales más escasamente representadas. Sin embargo, como se ve por las Figuras 5 a 7, en general hay una buena concordancia entre la función de daños específica según la edad, deducida del análisis de mortalidad por emisión de la Etapa I de nuestro análisis, y la obtenida basándose en las estaciones de medición de la EPA y agrupando las emisiones de los condados sin estaciones de medición con los que sí las tienen (etapa II de nuestro análisis). Los datos concuerdan razonablemente bien con los calculados o basados en los trabajos de Lave y Seskin, Morgan y otros, y Mendelsohn y Orcutt, Ref. [16], para el SO_4 , y con los de Winkelstein, y Lave y Seskin, para el TPS.

Mendelsohn y Orcutt, Ref. [16], dan una función de daños específica según la edad para los varones blancos de 45 a 64 años, que es de 16,7 por 10^5 por $\mu\text{g SO}_4/\text{m}^3$. Las correspondientes

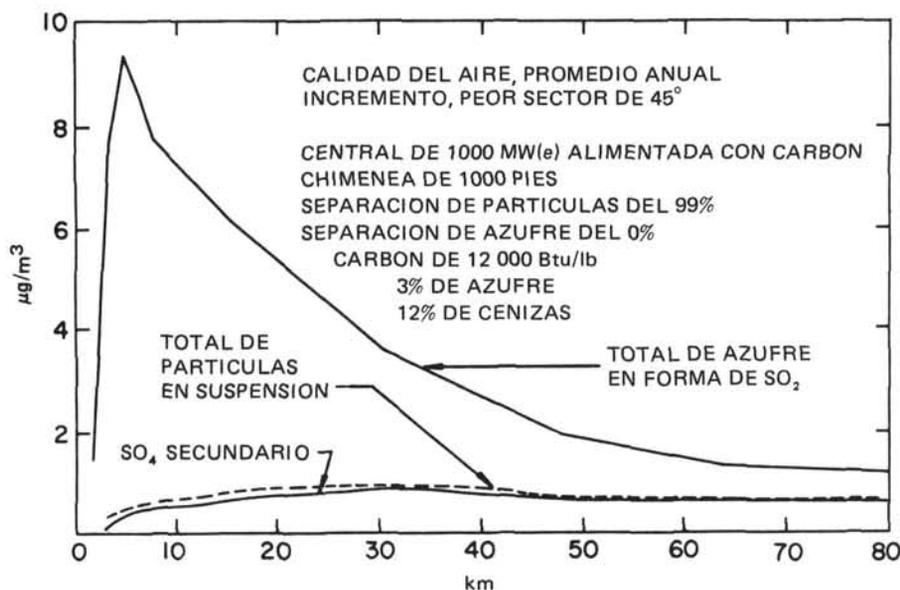


Figura 8. Distribución de SO₂, total de partículas en suspensión, y SO₄ secundario en el peor sector de 45°, en un radio de 80 kilómetros a partir de una central eléctrica tipo, alimentada con combustible fósil, de 1000 MW(e), utilizando un modelo de dispersión según la rosa de los vientos, con una tasa constante de transformación de SO₂ en SO₄, Ref. [17].

funciones de daños de la Etapa I y la Etapa II de nuestro análisis son de 9,1 y 14,4, respectivamente. De modo análogo, para los varones blancos de 65 años y más, su cifra es de 82,2; nuestros valores correspondientes, deducidos de la Etapa I y de la Etapa II, son 20,1 y 38,1. Su función de daños para hembras de 45 a 64 años es de 8,0 por 10⁵ por µg SO₄/m³; los correspondientes valores de la Etapa I y la Etapa II de nuestros análisis son 3,7 y 6,2. Asimismo, para las hembras blancas de 65 años y más, su cifra es de 56,9; nuestros valores correspondientes resultantes de la Etapa I y de la Etapa II son 16,7 y 37,6. Estas comparaciones confirman la sorprendente analogía entre las funciones de daños específicas según la edad que hemos calculado y las dadas por otros estudios epidemiológicos. La discrepancia de la función de daños para la exposición a SO₄ resultante de la Etapa I y la Etapa II, para las edades de más de 60 años, puede atribuirse a las diferencias en el tamaño de las poblaciones abarcadas por cada etapa y a la insuficiente representación de la población rural en la Etapa II.

Planta tipo de 1000 MW(e) de BEAD

Está situada en una llanura y las tasas de emisión para la contaminación atmosférica se determinan suponiendo ciertas características del combustible y de la central, y dispositivos de control de la emisión. Al principio, Ref. [17], utilizamos una distribución de la velocidad del viento y de la estabilidad atmosférica que representa una combinación de las condiciones atmosféricas existentes alrededor de centrales nucleares, Ref. [18], y a continuación datos meteorológicos del Aeropuerto Internacional de Pittsburgh, Ref. [8]. Inicialmente, para la

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 6. Exceso de mortalidad causado por la exposición a la contaminación atmosférica resultante de una central alimentada con combustible fósil, de 1000 MW(e), en un radio de 80 km (altura de la chimenea, 305 m; factor de capacidad 65%).

	Exceso de muertes, número anual			
	Estudios sobre numerosas ciudades ¹			Buffalo ¹
	10% inferior	Mediana	10% superior	Lineal
Carbón de la parte oriental, alto en azufre ($2,9 \times 10^7$ J/kg de carbón, 3% de azufre) ($1,25 \times 10^4$ Btu/lb)*				
Sin separación del azufre				
3 $\times 10^6$ personas en un radio de 80 km	0	17	87	113
0,7 $\times 10^6$ personas en un radio de 80 km	0	4	20	27
Separación de 90% del azufre				
3 $\times 10^6$ personas	0	1,7	9	11
0,7 $\times 10^6$ personas	0	0,4	2	2,7
Carbón de la parte oriental, bajo en azufre ($2,9 \times 10^7$ J/kg, 0,4% de azufre) ($1,2 \times 10^4$ Btu/lb)				
Sin separación del azufre				
3 $\times 10^6$ personas	0	2,3	11	16
0,7 $\times 10^6$ personas	0	0,5	2,7	3,5
Carbón de Montana ($2,1 \times 10^7$ J/kg, 0,8% de azufre) ($8,6 \times 10^3$ Btu/lb)				
Sin separación del azufre				
3 $\times 10^6$ personas	0	6,3	32	42
0,7 $\times 10^6$ personas	0	1,5	7,4	9,5
Petróleo alto en azufre ($4,6 \times 10^7$ J/kg, 2,5% de azufre) (2×10^4 Btu/lb)				
Sin separación del azufre				
3 $\times 10^6$ personas	0	9	45	61
0,7 $\times 10^7$ personas	0	2,1	10,6	14
Petróleo bajo en azufre ($4,6 \times 10^7$ J/kg, 0,2% de azufre) (2×10^4 Btu/lb)				
Sin separación del azufre				
3 $\times 10^6$ personas	0	0,7	3,6	4,8
0,7 $\times 10^7$ personas	0	0,2	0,9	1,1

¹ Resultados de un nuevo análisis de los datos de Lave y Winkelstein.

* Btu/lb = Unidad térmica británica/libra.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 7. Resumen de los efectos del ciclo del combustible de carbón por central de 1000 MW(e)-año; factor de capacidad, 65%)*

	Muertes	Enfermedad/lesión
Minería¹		
Público	—	—
Trabajadores		
Lesión accidental ²	0,6	42
Enfermedad profesional	0,02–0,4	0,5–1,0
Tratamiento		
Público		
Trabajadores		
Lesión accidental	0,05	2,9
Enfermedad profesional	—	—
Transporte³		
Público y trabajadores		
Lesión accidental	0,3–1,3	1,2–5,9
Generación de electricidad		
Público		
Contaminación atmosférica (radio de 50 millas) ⁴	0,6 (0–3)	Sin estimar
Contaminación atmosférica (total, Estados Unidos) ⁵	6 (0–30)	Sin estimar
Trabajadores		
Lesión accidental ⁶	0,1 (0,02–0,3)	3,3 (2,7–4,0)
TOTAL	7,7–9,1	

¹ Se supone un 62% de minería subterránea y 38% a cielo abierto (proporción en la producción de carbón en los Apalaches), Ref. [21a].

² Lesiones accidentales (no mortales) de mineros (hombres entre 1965 y 1973).

Minería subterránea — 27,6 lesiones por 10⁶ toneladas

Minería a cielo abierto — 5,2 lesiones por 10⁶ toneladas

$[(27,6 \times 0,62) + (5,2 \times 0,38)] \times 2,2 \times 10^6 = 42$ lesiones por central año, Ref. [21b].

³ Se supone el transporte por ferrocarril, con recorridos de 300 millas. El intervalo se debe a los diferentes métodos de estimación.

⁴ Se suponen 3 millones de personas en un radio de 50 millas y una tasa de emisión de óxido de azufre de 0,12 lb de SO₂ por 10⁶ Btu (carbón bajo en azufre, combinado con una separación de 90% del azufre en los gases de combustión). Los resultados son aproximadamente lineales para las emisiones de SO₂.

⁵ Se supone que el efecto total es 10 veces el efecto local.

⁶ Estimaciones de Bertollett y Fox, con límites de confianza de 95% según Poisson.

* Una central de 1000 MW(e), funcionando con un factor medio de capacidad de 65%, produce 0,65 GW, ó 2,05 10¹⁶ J, ó 1,94 10¹³ Btu en un año.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 8. Resumen de los efectos del ciclo del combustible nuclear (por central de 1000 MW(e)-año; factor de capacidad, 65%)*

	Muertes	Enfermedad/lesión
Minería		
Público	0,08	0,08
Trabajadores		
Cáncer radioinducido	0,06	0,03
No radioinducido		
Enfermedad profesional	0,07	0,14-2,8**
Accidentes profesionales	0,31	11,96
TOTAL PARCIAL	0,52	12,21-14,87
Tratamiento		
Público	0,002	0,002
Trabajadores		
Cáncer radioinducido	0,034	0,034
Accidentes profesionales	0,004	1,3
TOTAL PARCIAL	0,04	1,34
Generación de electricidad		
Público habitual	0,017	0,017
Trabajadores		
Cáncer radioinducido	0,07	0,07
Accidentes profesionales	0,013	1,13
Accidentes catastróficos	0,1	-
TOTAL PARCIAL	0,20	1,217
Gestión de desechos		
Público	$5,1 \times 10^{-5}$	$5,1 \times 10^{-5}$
Trabajadores	$7,45 \times 10^{-4}$	$7,45 \times 10^{-4}$
TOTAL PARCIAL	$7,96 \times 10^{-4}$	$7,96 \times 10^{-4}$
Transporte		
Público habitual	$6,1 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$
Trabajadores		
Cáncer radioinducido	$8,5 \times 10^{-4}$	$8,5 \times 10^{-4}$
Accidentes profesionales	0,01	0,1
Accidentes catastróficos		
Cánceres	$8,3 \times 10^{-5}$ a	$8,3 \times 10^{-5}$ a
	$7,1 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$
Muertes inmediatas	$2,1 \times 10^{-7}$ a	
	$9,3 \times 10^{-5}$	
TOTAL PARCIAL	0,01	0,10

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 8.
(continuación)

	Muertes	Enfermedad/lesión
Clausura		
Público	$5,3 \times 10^{-9}$	$5,3 \times 10^{-9}$
Trabajadores		
Cáncer radioinducido	$4,2 \times 10^{-3}$	$4,2 \times 10^{-3}$
Accidentes profesionales	$8,0 \times 10^{-4}$	0,07
TOTAL PARCIAL	5×10^{-3}	0,07
TOTAL	0,77	14,9–17,6

* Una central de 1000 MW(e), funcionando con un factor medio de capacidad de 65%, produce 0,65 GW, ó $2,05 \times 10^{16}$ J, ó $1,94 \times 10^{13}$ Btu en un año.

** Valores basados en la razón enfermedad profesional/muerte en mineros del carbón. Para el total se ha tomado la estimación menor.

distribución de la población en el radio de 80 km, se tomó la de la población media alrededor de centrales nucleares existentes, Ref. [17, 18], y después, la de la población en un radio de 80 km a partir de las tres primeras de cada cuatro centrales ubicadas en la zona de Pittsburgh, Ref. [8]. Los componentes iniciales de la contaminación atmosférica se detallan en otro sitio, Ref. [8]. Se supuso que un pequeño porcentaje del azufre se transformaba en sulfato en la central, esto se representó como una probabilidad subjetiva con un valor mediano de 1,5%, y que el resto era emitido en forma de SO_2 . Se utilizó un modelo de dispersión meteorológico basado en la rosa de los vientos, combinado con un modelo de la química atmosférica basado en una tasa de transformación lineal SO_2-SO_4 (variando con la distancia), para determinar la exposición a nivel del suelo en un radio de 80 km a partir de la central (véase la Figura 8 para la distribución pronta del SO_2 , el TPS, y el SO_4 secundario). El empleo de una tasa de transformación lineal SO_2-SO_4 (variando con la distancia) es el único elemento de química atmosférica introducido en el análisis hasta ahora.

La adopción de un solo índice de contaminación — el de los sulfatos — es sin duda una manera demasiado simplista de proceder al determinar los riesgos derivados de la contaminación atmosférica para la salud. Por último, debido a un conocimiento deficiente de la curva de exposición-respuesta, en particular a bajos niveles de contaminación atmosférica, hemos supuesto una relación dosis-efecto lineal, como es usual al estimar los riesgos radiológicos. Puesto que consideramos los efectos de pequeños incrementos de niveles de fondo de la contaminación atmosférica próximos a dosis clínicamente efectivas, el error de este supuesto, como se ha señalado, será probablemente menor que el causado por extrapolación de dosis altas a dosis bajas de radiación. Incluso si la curva de exposición-respuesta no fuese lineal, los niveles que consideramos probablemente no se encuentran muy lejos de la parte lineal de la curva.

El Cuadro 6 indica el aumento de la mortalidad en un radio de 80 km que cabe esperar para distintas alternativas tecnológicas y demográficas, de la contaminación atmosférica causada por una central de 1000 MW(e) alimentada con combustible fósil. Esta central teórica

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

se ha supuesto que tiene una chimenea de 305 m, con un diámetro de salida de la chimenea de 8,2 m, una velocidad de salida de los gases de la chimenea de 16 m/s, y una temperatura de salida de 135°C. En dicho cuadro no se consideran los posibles efectos adicionales de otros contaminantes ni los efectos más allá del radio de 80 km.

Los Cuadros 7 y 8 resumen nuestras estimaciones actuales de los efectos que tiene sobre la salud una central tipo, suponiéndola dotada de los controles ambientales actualmente preceptivos, Ref. [19]. El Cuadro 7 muestra las estimaciones actuales de los efectos del ciclo del combustible de carbón sobre la salud, basadas en una central tipo. Hemos procurado ante todo cuantificar los accidentes en la minería del carbón y las enfermedades profesionales, los accidentes de transporte del carbón, y la contaminación atmosférica por combustión del carbón. El Cuadro 8 constituye un resumen de los efectos del ciclo del combustible nuclear, basándose en una central tipo.

Los riesgos derivados de accidentes catastróficos solo se han evaluado a fondo para los reactores de agua ligera. De todas formas, probablemente son atribuibles a los reactores la mayoría de los efectos potenciales de grandes accidentes nucleares en el ciclo del combustible de uranio, ya que representan el 80% de las instalaciones y, si se produjese un accidente, las consecuencias sobre la salud de un accidente en un reactor es probable que fuesen mucho más graves que las de un accidente en otros tipos de instalaciones del ciclo del combustible de uranio.

Sobre una base actuarial, en el Reactor Safety Study, Ref. [20], se ha estimado que los accidentes de reactor causan solo 0,02 muertes por GW(e) año. Como la mayoría de los efectos para la salud calculados admitiendo incluso el accidente hipotético más grave son atribuibles a la acción de bajas dosis sobre una gran población, en el Reactor Safety Study se han aplicado factores de dosis y de tasa de dosis. Haciendo su reconversión conforme a la estimación superior se obtiene 0,1 muertes por GW(e) año. El uso de esta cifra en el Cuadro 8 compensa en cierto modo la mayor incertidumbre de las estimaciones sugeridas en el Ad Hoc Risk Assessment Review Group, presidido por H.W. Lewis, Ref. [22]. Ambos cuadros representan los efectos que cabe esperar adoptando una buena práctica y controles completos en las centrales por construir.

ETAPA III: MULTIPLICACION DE LA CENTRAL TIPO DE 1000 MW(e)/AÑO (modelo de contaminación en un radio de 80 km)

A fin de calcular los efectos totales para la salud derivados de la producción de electricidad en los Estados Unidos en 1975, se han empleado datos análogos a los de los Cuadros 7 y 8, que proceden de anteriores análisis del ciclo del combustible, inclusive petróleo y gas, y reflejan las prácticas actuales; dichos efectos se han estimado solo para las poblaciones situadas en un radio de 80 km a partir de las centrales, Ref. [23]. Estos datos se resumen en el Cuadro 9.

Los efectos sobre la salud estimados en 1975, para un ciclo total del combustible tipo que produzca 10^{10} kWh de electricidad (aproximadamente la producción anual de dos centrales de 1000 MW(e)), son:

- con carbón: de 20 a 300 muertes, de 100 a 300 casos de incapacidad;
- con gas: de 0 a 2 muertes, 20 casos de incapacidad;
- con combustible nuclear: de 1 a 3 muertes, de 7 a 40 casos de incapacidad.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 9. Efectos para la salud estimados en 1975, derivados de la producción de electricidad

Combustible	1975 (kWh(e) $\times 10^9$) ¹	Número equivalente de centrales de 1000 MW(e)	Muertes estimadas	Casos estimados de incapacidad
Carbón	844	128	1 900—15 000	25 000—39 000
Petróleo	292	44	88—4 400	4 000—7 900
Gas	297	45	6	600
Nuclear	168	26	18—42	130—470
Totales	1604	243	2 000—19 000	29 000—48 000

¹ Cifra preliminar.
[Datos tomados de *Electrical World*, 185(6), 54 (1976).]

En una perspectiva global, el número total anual de muertes en los Estados Unidos es $\sim 2 \times 10^6$; el porcentaje resultante de la producción de electricidad es de 0,1—1. El número aproximado de muertes para las edades de 1 a 74 años en los Estados Unidos es de $1,1 \times 10^6$; el porcentaje resultante de la producción de electricidad es de 0,2—1,9. Cabe comparar este valor con $\sim 17\%$ de muertes por fumar, con 2,5% de muertes por accidentes de automóvil, la mitad de ellos causados por conductores embriagados, y con $\sim 5\%$ de muertes de origen yatrogénico.

ETAPA IV: EFECTOS PARA LA SALUD RESULTANTES DE LAS FUENTES DE ENERGIA RENOVABLES

El sistema energético de referencia descrito antes* se usa ampliamente en los análisis de los daños para la salud derivados de las tecnologías energéticas tradicionales, pero su uso es más limitado al analizar las tecnologías en las que no hay repercusiones debidas al combustible, por ejemplo, en el caso de algunas fuentes energéticas renovables tales como las fotovoltaicas. A este respecto varios investigadores han examinado las repercusiones debidas a los sistemas de materiales necesarios para tales fuentes energéticas, Ref. [24—28]. Está por establecer una base uniforme que permita efectuar análisis coherentes.

Para que sea posible, partiendo de esta base, hacer estimaciones de los costos de sanidad y seguridad laboral, así como de los desechos resultantes para el medio ambiente y, por tanto, de los daños para la sanidad pública, los elementos que se han de especificar son los siguientes: i) demanda de materiales de uso final; ii) coeficientes de rendimiento de todos los procesos, es decir, la razón insumos/productos; iii) estimaciones normalizadas de la productividad del personal para todos los procesos; por ejemplo, la cantidad de personal necesaria para extraer una unidad de material, concretamente, una tonelada de cobre; iv) los coeficientes de sanidad

* Etapa II: Enfoque del ciclo del combustible normalizado para una central de 1000 MW(e) año.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

y seguridad laboral por proceso; v) los coeficientes de emisión al medio ambiente por proceso. La especificación de la estructura del sistema y de las magnitudes i) a v) basta para calcular los riesgos desde el punto de vista de la sanidad y la seguridad laboral, así como los residuos para el medio ambiente resultantes de una tecnología de fuentes renovables.

Basándose en las repercusiones de los sistemas de materiales, Inhaber, Refs. [25, 26], ha estimado cuantitativamente los días-trabajador perdidos (DTP) o los días-persona del público perdidos (DPP) para seis tecnologías energéticas no tradicionales: metanol, térmica oceánica, fotovoltaica, solar para calefacción de locales, solar termoeléctrica y eólica, y las ha comparado con estimaciones hechas para cinco tecnologías existentes: carbón, gas natural, nuclear, petróleo e hidráulica. Los riesgos para la salud se han cuantificado correlacionando las necesidades de personal y materiales específicas por cada tecnología con las estadísticas de sanidad laboral, a fin de estimar los efectos para los trabajadores, y evaluando las emisiones de contaminantes atmosféricos y las repercusiones del transporte de materiales sobre el público, para estimar los daños para la sanidad pública. A fines de comparación de los efectos de las nuevas tecnologías con las ya existentes, Inhaber afirmó que su análisis incluía no solo los ciclos del combustible primario, sino todos los ciclos de la producción de energía, inclusive el acopio de materiales, transporte, fabricación, construcción, explotación y mantenimiento, clausura y evacuación.

Tal vez esto sea cierto para su análisis de las nuevas tecnologías, pero salta inmediatamente a la vista que el de las tecnologías existentes es necesariamente más incompleto. Sin embargo, Inhaber llegó a la conclusión de que los riesgos para la salud derivados de las fuentes energéticas no tradicionales podrían ser tan elevados, o incluso más, que los de las fuentes tradicionales. El riesgo de las nuevas fuentes energéticas se debía a sus grandes necesidades de materiales y personal para su construcción, así como al hecho de que requerían sistemas de apoyo y almacenamiento energético. Inhaber estimó que el apoyo y el almacenamiento se necesitarían para hacer frente a la demanda de electricidad durante épocas de tiempo desfavorables, por ejemplo, sin viento, sin sol. Supuso que las centrales alimentadas con carbón facilitarían este apoyo energético, calculó los riesgos resultantes de esta tecnología complementaria y los sumó a los riesgos calculados de las nuevas tecnologías, operación en la que los riesgos atribuibles a la tecnología de apoyo resultaron a menudo ser los mayores.

No es sorprendente que este análisis de Inhaber fuese objeto de duras críticas, en especial de Holdren, Refs. [27, 28], sus colaboradores y otros, Ref. [29]. Aparte de muchos errores matemáticos y concepciones poco fundadas, por ejemplo, en cuanto a tipos y cantidades de materiales utilizados, estrategias de control aplicadas, contaminantes emitidos, y del carácter incompleto de los actuales ciclos de combustible energético en comparación con los de las nuevas tecnologías, la adopción del ciclo del combustible de carbón como energía de apoyo dio lugar a la mayoría de los valores superiores de los riesgos totales para la salud derivados de las tecnologías renovables. Hubiese sido más razonable considerar que, a corto plazo, las fuentes de electricidad intermitentes y renovables no se utilizarían como centrales de carga básica sino como centrales intermedias economizadoras de combustible, que permitirían reducir la demanda de electricidad generada por combustible fósiles, aprovechando la energía eólica y solar siempre que fuese factible. Esta forma de explotación no requiere sistemas de apoyo ni de almacenamiento. El riesgo neto de producir electricidad por tecnologías no convencionales es el riesgo de establecer y explotar las tecnologías renovables *menos* los riesgos mayores de suministrar y quemar las cantidades de combustibles fósiles que las fuentes renovables, sustitutorias de los combustibles fósiles, permitan realmente conservar.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 10. Riesgos para la salud derivados de las tecnologías energéticas renovables y existentes*

	Inhaber	Holdren y otros
Nuclear		
DTP	1,7-8,7	3,1-12
DPP	0,3-1,5	0,3-70
Térmica oceánica		
DTP	23-30	2,2-4,6
DPP	0,8-1,4	0,40-0,90
Solar, calefacción		
DTP	91-100	11-17
DPP	4,6-9,5	2,1-5,5
Metanol		
DTP	220-350	6,3-6,6
DPP	0,05-0,14	0,005-0,015
Solar, termoeléctrica		
DTP	62-100	7,4-15
DPP	9,4-520	1,0-2,7
Fotovoltaica		
DTP	140-190	5,0-14
DPP	10-510	0,9-2,2
Eólica		
DTP	220-290	9,7-10
DPP	22-540	0,21-0,58
Petróleo		
DTP	2-18	3-19
DPP	9-1900	9-1000
Carbón		
DTP	18-73	19-43
DPP	20-2000	20-1500

* Días-trabajador perdidos (DTP) o días-persona del público perdidos (DPP) por megavatio-año de producción, datos redondeados a dos cifras significativas. [Adaptación del Cuadro 1.5 de la Ref. [31]].

El examen y nuevo análisis de los datos de Inhaber, realizado por Holdren, reduce los riesgos laborales resultantes de todas las nuevas tecnologías ~6-50 veces, los riesgos para la sanidad pública ~9-900 veces, Ref. [28] (Cuadro 10). Las tecnologías tradicionales existentes son más perjudiciales que las nuevas tecnologías, es decir, las conclusiones son opuestas a las de Inhaber. Una dificultad persiste con todas estas comparaciones: el carácter incompleto de los análisis de los actuales ciclos en comparación con los de las nuevas tecnologías. La Biomedical and Environmental Assessment Division (BEAD) de Brookhaven ha tomado las primeras medidas a fin de efectuar estas comparaciones elaborando métodos de evaluación de los daños para la salud derivados de las fuentes energéticas renovables.

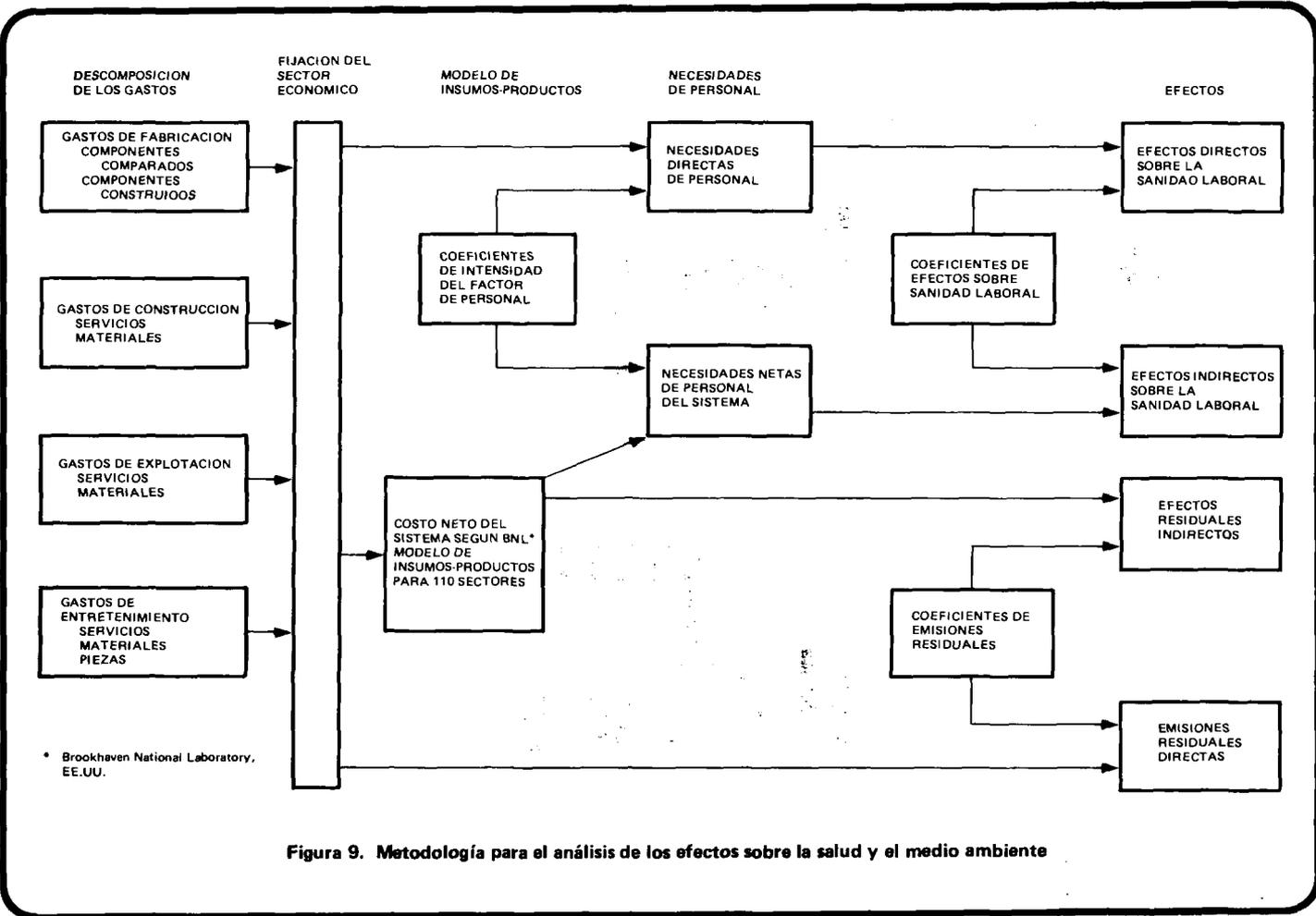


Figura 9. Metodología para el análisis de los efectos sobre la salud y el medio ambiente

ETAPA V: CONTABILIDAD DE LOS RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE: APLICACION DEL ANALISIS DE INSUMOS-PRODUCTOS

El método de contabilidad de riesgos para el análisis de los efectos sobre la salud y el medio ambiente, que está elaborando la Biomedical and Environmental Assessment Division (BEAD) del National Center for Analysis of Energy Systems, estima las consecuencias para la sanidad laboral y las emisiones residuales resultantes de las actividades de fabricación, construcción, explotación y mantenimiento exigidas por las tecnologías energéticas (Fig. 9). El método se basa en un modelo de insumos-productos de la economía nacional, que permite seguir las corrientes de dólares en el sistema y calcular las variaciones netas de la producción provocadas por la demanda de materiales, bienes y servicios para las tecnologías energéticas. Este método posee varias ventajas con respecto al análisis tradicional basado en las corrientes de materiales, ya que el análisis es completo y no circunscrito únicamente a los materiales utilizados en grandes cantidades. El análisis abarca los efectos para todo el sistema así como los efectos directos de la construcción y explotación de instalaciones energéticas.

El método parte de un supuesto importante, a saber, que las estimaciones de los gastos de ingeniería son la información más accesible, detallada y exacta disponible para la mayoría de las tecnologías energéticas en desarrollo. Los gastos de ingeniería suelen estimarse creando un diseño preliminar integrado por componentes de características conocidas — normalmente componentes ya en producción — y que se parecen a los componentes necesarios lo bastante para permitir estimaciones exactas de los gastos. Para muchas tecnologías en las primeras etapas de desarrollo éstos son los únicos datos disponibles lo suficientemente detallados y precisos para su utilización en un análisis de los efectos sobre la salud y el medio ambiente.

Si la tecnología en desarrollo se divide en componentes de características conocidas, los daños directos para la salud y el medio ambiente serán la suma de los daños derivados de los componentes necesarios para producirla. La contabilidad BEAD de los riesgos empieza asignando el costo de los componentes tecnológicos, por ejemplo, equipo básico, materiales, componentes comprados, construcción, explotación, mantenimiento, etc., según el código de Standard Industrial Classification (SIC) más apropiado para dicho componente (Cuadro 11). Se utilizan las estadísticas nacionales sobre la intensidad del factor personal en la industria para convertir el costo en dólares en horas-hombre de personal requeridas. Las estadísticas nacionales sobre sanidad laboral por horas-hombre por industria sirven para estimar los accidentes, enfermedades y muertes laborales (Cuadro 12), y para calcular las emisiones totales se usan los datos nacionales sobre las emisiones residuales por industria.

Los efectos indirectos sobre la salud y el medio ambiente son los causados en toda la economía al atender a la demanda de bienes y servicios resultante de la tecnología energética. Si la tecnología requiere un generador, la industria que fabrica el generador ha de comprar alambre de cobre aislado, la compañía que fabrica el alambre debe comprar plástico para el aislante, y la compañía de plástico ha de comprar petróleo como materia prima, etc. En todas estas industrias hay empleados que han de comprar zapatos, para lo que alguien tiene que criar ganado. Es muy probable que varias de estas industrias requieran también generadores, y de esta manera el ciclo se repite. Los modelos de insumos-productos están concebidos especialmente para describir estas interconexiones. El modelo de insumos-productos utilizado actualmente en el método BEAD es un modelo de 110 sectores elaborado por el Brookhaven National Laboratory (BNL) (Cuadro 13).

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 11. Códigos asignados en SIC* para los sistemas de conversión de la energía eólica

Componentes	Insumos	Código SIC preferido	Descripción según SIC
Pala de rotor	Fibra de vidrio, laminados epoxídicos	3728	Piezas y equipo auxiliar de aeronaves, no clasificados en otra parte. Incluye las hélices de paso fijo y variable
Cubo de rotor	Cojinetes y acero estructural	3568	Equipo mecánico de transmisión de fuerza, no clasificado en otra parte. Incluye cojinetes, acoplamientos, manguitos y ejes
Mecanismos de transmisión	Caja de engranajes, ejes, cojinetes	3566	Cambiadores de velocidad, mecanismos accionadores de alta velocidad y engranajes
Generador	Generador, conmutadores, relés de transformador, controles	3621	Motores y generadores. Incluye convertidores, generadores e inversores
Torre y cimientos	Acero estructural, hormigón y fabricación	1541	Contratistas generales — edificios y almacenes industriales. Incluye la construcción de edificios prefabricados
Controles	Sistemas hidráulico y electrónico	3622	Controles industriales. Incluye controles, embragues e interruptores. Servicios de ingeniería, de arquitectura y topográficos
Varios	Integración del sistema de ingeniería, ensayos, piezas de repuesto y terrenos	8911	Servicios de ingeniería, de arquitectura y topográficos
Explotación	Personal de explotación, supervisores y jefe	73	Establecimientos dedicados principalmente a prestar servicios, en particular de gestión y consulta
Mantenimiento	Inspección ordinaria, mantenimiento y reparación de la central		
Rotor		3728	Partes y equipo auxiliar de aviación no clasificado en otra parte. Incluye hélices de paso constante y variables
Equipo energético		762	Talleres eléctricos de reparación, incluye equipo industrial eléctrico y electrónico
Torre		176	Tejados y chapistería metálica; incluye pintura y reparaciones
Edificios y emplazamiento		7349	Servicio de limpieza y mantenimiento de los edificios

* SIC = Standard Industrial Classification (Clasificación Industrial Uniforme).

Cuadro 12. Evaluación de los efectos sobre la sanidad laboral: sistemas de conversión de la energía eólica

Componente	Código SIC	Costo	Costo	Intensidad del factor personal	Necesidades de personal	Coeficientes de efectos		Efectos sobre la sanidad laboral	
		\$ de 1976/ 1,5 MW de potencia nominal ¹	10 ⁶ \$ de 1976/ 10 ¹² Btu producidas ²			\$ de 1976/ hora-hombre	Año-hombre 10 ¹² Btu ³	Enfermedades y lesiones/ 100 años-hombre	Muertes/ 1000 años-hombre ⁴
Pala de rotor	3728	72 300	0,141	26,334	2,68	10,7	0,06	0,287	0,161 × 10 ⁻³
Cubo de rotor	3568	129 700	0,254	27,055	4,69	13,9	0,06	0,652	0,281 × 10 ⁻³
Transmisión	3566	191 000	0,374	27,055	6,91	15,5	0,06	1,071	0,415 × 10 ⁻³
Generador	3621	67 900	0,133	22,298	2,98	11,0	0,06	0,328	0,179 × 10 ⁻³
Torre y cimientos	1541	112 000	0,219	22,764	4,81	19,3	0,25	0,928	1,20 × 10 ⁻³
Controles	3622	14 400	0,028	22,298	0,628	9,6	0,06	0,0603	0,0377 × 10 ⁻³
Varios	891	178 000	0,348	16,080	1,08	2,6	0,05	0,0281	0,0540 × 10 ⁻³
Explotación	73	13 722/a	0,806	16,804	24,0	4,7	0,05	1,128	0,120 × 10 ⁻³
Mantenimiento									
Rotor	3728	20 400/a	1,20	26,334	22,8	10,7	0,06	2,44	1,37 × 10 ⁻³
Equipo energético	762	9 583/a	0,563	7,612	37,0	6,9	0,05	2,55	1,85 × 10 ⁻³
Torre	176	695/a	0,0408	19,033	1,07	21,4	0,25	0,229	0,268 × 10 ⁻³
Edificios y emplazamiento	7349	52/a	0,00305	16,804	0,0908	7,2	0,05	0,00654	0,00454 × 10 ⁻³
TOTAL			4,11		108,7			9,71	0,00702

¹ Costos estimados en dólares de los Estados Unidos para una central de eje horizontal, de 1,5 MW, con torre toda de acero y cimientos. Diseñada por Kaman Aerospace Corporation, Ref. [30].

² Se supone que el factor de potencia es de 0,38, apropiado para regímenes de vientos fuertes, Ref. [31]; la vida útil de la central se supone de 30 años. La producción total es de 0,511 × 10¹² Btu de electricidad.

³ Un año-hombre equivale a 2000 horas-hombre.

⁴ Tasas de mortalidad estimadas según grandes grupos industriales, Ref. [32].

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 13. Clasificación de sectores para el modelo de insumos y productos energéticos del BNL.

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Carbón 2. Petróleo crudo
Gas crudo 3. Petróleo de esquisto 4. Metano extraído de carbón 5. Licuefacción de carbón 6. Productos refinados de petróleo 7. Gas de gasoducto 8. Ciclo en combinación con el carbón – electricidad 9. Otros combustibles fósiles – electricidad 10. Reactor de agua ligera – electricidad 11. Reactor de alta temperatura moderada por grafico – electricidad
Hidroelectricidad 12. Energía geotérmica
Solar eléctrica
Solar directa | <ol style="list-style-type: none"> 36. Suministros y accesorios 37. Productos alimenticios y conexos 38. Manufacturas de tabaco 39. Tejidos anchos y estrechos, fábricas de hilados y fibras 40. Géneros textiles diversos y revestimientos de pisos |
| <ol style="list-style-type: none"> 13. Materiales para la reducción de minerales 14. Materiales químicos 15. Fuerza motriz 16. Calor industrial 17. Calentamiento de agua 18. Calefacción de locales 19. Acondicionamiento de aire 20. Electricidad | <ol style="list-style-type: none"> 41. Prendas de vestir 42. Productos textiles diversos elaborados 43. Madera y productos de madera, excepto contenedores 44. Contenedores de madera 45. Muebles domésticos |
| <ol style="list-style-type: none"> 21. Ganadería y productos del ganado 22. Otros productos agrícolas 23. Productos forestales y de pesca 24. Servicios agrícolas, forestales y de pesca 25. Extracción de minerales de hierro y ferroaleaciones | <ol style="list-style-type: none"> 46. Otros muebles y efectos 47. Papel y productos conexos, excepto contenedores y cajas 48. Cajas y contenedores de cartón 49. Impresión y edición 50. Materiales químicos y ciertos productos químicos |
| <ol style="list-style-type: none"> 26. Extracción de minerales de metales no férreos 27. Extracción de piedra y arcilla, cantería 28. Extracción de minerales para fertilizantes y productos químicos | <ol style="list-style-type: none"> 51. Materiales plásticos y sintéticos 52. Medicamentos, artículos de limpieza y tocador 53. Pinturas y productos conexos 54. Bloques y mezclas para pavimentación 55. Revestimientos y fieltros asfaltados |
| <ol style="list-style-type: none"> 29. Nueva construcción, edificios residenciales 30. Nueva construcción, edificios no residenciales 31. Nueva construcción, obras públicas 32. Nueva construcción, carreteras 33. Nueva construcción, toda la demás 34. Obras de mantenimiento y reparación, edificios residenciales 35. Obras de mantenimiento y reparación, todas las demás | <ol style="list-style-type: none"> 56. Caucho y productos plásticos diversos 57. Curtidos y productos industriales de cuero 58. Calzado y otros productos de cuero 59. Vidrio y productos de vidrio 60. Productos de arcilla y piedra 61. Manufacturas primarias de hierro y acero 62. Manufacturas primarias de metales no férreos 63. Contenedores metálicos 64. Calefacción, fontanería y productos elaborados de metal estructural 65. Producción de roscadores, pernos, tuercas, etc. y estampados metálicos 66. Otros productos metálicos elaborados 67. Motores y turbinas 68. Maquinaria agrícola 69. Equipo y maquinaria de construcción, de minería y de campos petrolíferos 70. Equipo y maquinaria de manipulación de materiales |

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 13
(continuación)

<p>71. Equipo y maquinaria para el trabajo de metales</p> <p>72. Equipo y maquinaria industriales especiales</p> <p>73. Equipo y maquinaria industriales generales</p> <p>74. Productos de talleres mecánicos</p> <p>75. Máquinas de oficina, de cómputo y de contabilidad</p>	<p>91. Transporte motorizado de mercancías y almacenamiento</p> <p>92. Transporte por vía acuática</p> <p>93. Transporte aéreo</p> <p>94. Transporte por tuberías</p> <p>95. Servicios de transporte</p>
<p>76. Máquinas para industrias de servicios</p> <p>77. Equipo de trans. y distr. eléct. y aparatos para la industria eléctrica</p> <p>78. Aparatos domésticos</p> <p>79. Equipo de alumbrado eléctrico y cableado</p> <p>80. Equipo de radio, televisión y comunicaciones</p>	<p>96. Comunicaciones, excepto radiodifusión y televisión</p> <p>97. Radiodifusión y televisión</p> <p>98. Servicios de agua y sanitarios</p> <p>99. Comercio al por mayor y al por menor</p> <p>100. Finanzas y seguros</p>
<p>81. Componentes electrónicos y accesorios</p> <p>82. Maquinaria, equipo y suministros eléctricos diversos</p> <p>83. Vehículos de motor y equipo</p> <p>84. Aeronaves y piezas</p> <p>85. Otro equipo de transporte</p> <p>86. Instalaciones y suministros profesionales, científicos y de control</p> <p>87. Equipo y suministros ópticos, oftálmicos y fotográficos</p> <p>88. Manufacturas diversas</p> <p>89. Ferrocarriles y servicios conexos</p> <p>90. Transportes de pasajeros locales, urbanos e interurbanos por carretera</p>	<p>101. Inmuebles y alquileres</p> <p>102. Hoteles y alojamiento; servicios personales y de reparación, excepto reparación de automóviles</p> <p>103. Servicios comerciales</p> <p>104. Reparación y servicios de automóvil</p> <p>105. Diversiones</p>
	<p>106. Servicios médicos y educativos e instituciones sin fines lucrativos</p> <p>107. Empresas federales</p> <p>108. Empresas estatales y municipales</p> <p>109. Viajes, atenciones sociales y donativos comerciales</p> <p>110. Material de oficina</p>

El análisis BEAD de los efectos parte del supuesto de que la construcción y explotación de nuevas tecnologías energéticas crea un conjunto de demandas finales de bienes y servicios del sistema económico. Incluso los componentes que deben fabricarse especialmente durante la construcción se supone que son "comprados" al sistema existente. Partiendo de esta hipótesis, el modelo BNL de insumos-productos da la corriente total de dólares en todo el sistema generada por la fabricación, construcción, explotación y mantenimiento de cualquier tecnología energética. A continuación, la corriente total de dólares por industria se transforma en estimaciones de los efectos, para todo el sistema, sobre la sanidad laboral y el medio ambiente descritos anteriormente.

Los Cuadros 14 y 15 presentan estimaciones preliminares de los efectos de sanidad laboral directos y globales de una central eólica. Los efectos globales son de dos a tres veces mayores que los efectos directos de fabricación, construcción, explotación y mantenimiento de la central.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 14. Efectos directos de los sistemas de conversión de la energía eólica en la sanidad laboral (por 10^{12} Btu producidas)

Componentes	BNL Sector I-O	Personal (año/hombre)	Muertes (10^{-4} casos)	Enfermedades (10^{-1} casos)	Días perdidos
Pala de rotor	84	2,68	1,58	1,74	1,01
Cubo de rotor	73	4,69	2,77	7,14	3,65
Transmisión	73	6,91	4,08	10,5	5,38
Generador	77	3,28	1,94	3,18	4,98
Torre y cimientos	31	5,16	15,7	8,52	5,76
Controles	77	0,69	0,41	0,67	1,05
Varios	103	77,4	23,2	37,9	27,0
Explotación	103	17,9	5,38	8,79	6,26
Mantenimiento del rotor	84	0,02	0,01	0,01	0,01
Mantenimiento del equipo energético	102	0,04	0,01	0,02	0,01
Mantenimiento de la torre	35	0,00	0,00	0,00	0,00
Mantenimiento de los edificios y el emplazamiento	102	0,00	0,00	0,00	0,00
Total Efectos directos		118	55,1	78,5	55,1

Referencias

- [1] Hamilton, L.D., "Assessment of Risk of Damage to the Environment", En: Environmental Damage Costs, Actas de un Seminario celebrado por la OCDE, en agosto de 1972, Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, París (1974) 264-281.
- [2] Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los efectos de las Radiaciones Atómicas, Fuentes y efectos de la radiación ionizante, Informe a la Asamblea General y Anexos 1977, E.77.1x.1, Naciones Unidas, Nueva York (1977).
- [3] Hamilton, L.D., "Biological Significance of Environmental Radiation: Calculation of the Risk". Presented at the American Physical Symposium on Biological Significance of Environmental Radiation, Washington, D.C., (Abril de 1971).
- [4] Hamilton, L.D., "Areas of Uncertainty in Estimates of Health Risks", En: Symposium on Energy and Human Health: Human Costs of Electric Power Generation, patrocinado por la Graduate School of Public Health and Ohio River Basin Energy Study, Pittsburgh, Pennsylvania, 19 a 21 de marzo de 1979, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 20460 (1979) 499-568.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

Cuadro 15. Efectos indirectos de los sistemas de conversión de energía eólica en la sanidad laboral (por 10^{12} Btu producidas)

Componente	BLN Sector I-O	Mano de obra (año/hombre)	Muertes (10^{-4} casos)	Enfermedades (10^{-1} casos)	Días perdidos
Pala de rotor	84	6,19	4,63	5,42	3,48
Cubo de rotor	73	10,5	8,67	14,6	9,11
Transmisión	73	15,5	12,8	21,6	13,4
Generador	77	6,57	5,18	7,01	7,97
Torre y cimientos	31	10,7	21,5	16,1	11,3
Controles	77	1,38	1,09	1,48	1,68
Varios	103	156	95,1	105	73,6
Explotación	103	36,2	22,0	24,3	17,0
Mantenimiento del rotor	84	0,05	0,04	0,05	0,03
Mantenimiento del equipo energético	102	0,05	0,02	0,04	0,02
Mantenimiento de la torre	35	0,00	0,00	0,00	0,00
Mantenimiento de los edificios y el emplazamiento	102	0,00	0,00	0,00	0,00
Total Efectos indirectos		243	171	196	138

- [5] Hamilton, L.D., "Health Effects of Electricity Generation", En: Conference on Health Effects of Energy Production", patrocinado por Chalk River Nuclear Laboratories, Ontario, Canadá, 12 a 14 de septiembre de 1979 (en prensa).
- [6] Winkelstein, W., Kantor, S., Davis, E.W., Maneri, C.S., Mosher, W.E., The Relationship of Air Pollution and Economic Status to Total Mortality and Selected Respiratory System Mortality in Men, I: Suspended Particulates, Arch. Environ. Health 14:162-172 (1967).
- [7] Finch, S.J., Morris, S.C., "Consistency of Reported Effects of Air Pollution on Mortality", En: Pfafflin, J.R., and Ziegler, E.N., Eds., Advances in Environmental Science and Engineering, Vol.2, Gordon and Breach, Londres, Inglaterra (1979) 106-117.
- [8] Morgan, M.G., Morris, S.C., Meier, A.K., Schenk, D.L.A., A Probabilistic Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects from Coal-Fired Power Plants, Energy Syst. Policy 2(33):287-309 (1978).
- [9] Bozzo, S.R., Galdos, F., Novak, K.M., Hamilton, L.D., Medical Data Base: A Tool for Studying the Relationship of Energy-Related Pollutants to Ill Health, BNL 50840, Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y. (1978).

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

- [10] Bozzo, S.R., Novak, K.M., Galdos, F., Finch, S.J., Hamilton, L.D., Health Effects of Energy Use, BEAD, National Center for Analysis of Energy Systems (Julio de 1978).
- [11] Bozzo, S.R., Novak, K.M., Galdos, F., Hakoopian, R., Hamilton, L.D., Mortality, Migration, Income and Air Pollution: A Comparative Study, Soc. Sci. and Med. Geog., 13D(2), (1979) 95-109.
- [12] Lave, L.B., Seskin, E.P., Air Pollution and Human Health, John Hopkins University Press, Baltimore (1977).
- [13] Tanner, R.L., Marlowe, W.H., Size Discrimination and Chemical Composition of Ambient Airborne Sulfate Particles by Diffusion Sampling, Atmospheric Environment, 1977 (en prensa).
- [14] Weiss, R.E., et al., Sulfate Aerosol: Its Geographical Extent in the Midwestern and Southeastern United States, Science, 195:979 (1977).
- [15] Bozzo, S.R., Novak, K.M., Galdos, F., Hamilton, L.D., A Comparative Study of Air Pollution Health Damage Using Different Pollution Data (en preparación).
- [16] Mendelsohn, R., Orcutt, G., An Empirical Analysis of Air Pollution Dose-Response Curves, J. of Envir. Economics and Management, 6 (1979) 85-106.
- [17] Hamilton, L.D., Morris, S.C., "Health Effects of Fossil Fuel Power Plants", En: Symposium on Population Exposures, Knoxville, Tennessee, NTIS, US Department of Commerce, Springfield, VA, CONF-7410018 (1974) 305-316.
- [18] US Atomic Energy Commission, Final Environmental Impact Statement, As Low as Practicable, USAEC Report WASH-1258 (1973).
- [19] Hamilton, L.D., Testimony on Comparative Health Effects of the Coal and Nuclear Fuel Cycles, in the Matter of the Power Authority of the State of New York (Greene County Nuclear Power Plant), No. 50-549, Case 80066, 5 y 6 de junio de 1978, before the US Nuclear Regulatory Commission (transcript pp. 18810-19130).
- [20] US Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study, WASH-1400 (NUREG 751014) (1975).
- [21a] US Bureau of Mines, Mineral Yearbook 1974, US Government Printing Office, Vol.1 (1976) 367-76.
- [21b] Morris, S.C., Novak, K.M., Hamilton, L.D., Data Book for the Quantification of Health Effects From Coal Energy Systems, Revision of Draft BNL23606, Dec. 1977 (en preparación).
- [22] UN Nuclear Regulatory Commission, Ad Hoc Risk Assessment Review Group Report on the US Nuclear Regulatory, NUREG/CR-0400.
- [23] Hamilton, L.D., "Alternative Sources and Health", En: R.J. Budnitz et. CRC Forum on Energy Session II-US. Electricity through the year 2000: Coal or Nuclear? CRC Press Inc. Cleveland, Ohio 44128 (1977) 1-49.
- [24] Morris, S.C., Novak, K.M., Hamilton, L.D., "Health Effects of Coal in the National Energy Plan", En: An Assessment of National Consequences of Increased Coal Utilization Executive Summary, US Department of Energy, Office of the Assistant Secretary for Environment, Washington, D.C., TID-2945, Vol.2 (Febrero de 1979) 12-1 to 12B-3.
- [25] Cinta de computadora, facilitada por Mitre Corporation, que representa el desglose al nivel de los condados del Modelo SEAS (Mayo de 1978).
- [26] Meyers, R.E., Cederwall, R.T., Kleinmann, L.I., Schwartz, S.E., En: "Assessment of National Consequences of Increased Coal Utilization - Executive Summary", US Department of Energy, Office of the Assistant Secretary for Environment, Washington, D.C., TID-2945, Vol.2 (Febrero de 1979) 6-1 to 6-40.
- [27] Meyers, R.E., Cederwall, R.T., Storch, J.A., Kleinmann, L.I., "Modelling Sulfur Oxide Concentrations in the Eastern United States: Model Sensitivity, Verification and Application", En: Fourth Symposium on Turbulence Diffusion, and Air Pollution, American Meteorological Society, Boston (1979) 673-676.
- [28] Rogozen, M.B., Margler, L.W., Martz, M.K., Hausknecht, D.F., Environmental Impacts of Coal Slurry Pipelines and Unit Trains, B28-B35, Science Applications, Inc., 14TIJ PB278 677/OWE (1977) 72-73.
- [29] Hall, E., Choi, P., Kropp, E., Assessment of the Potential of Clean Fuels and Energy Technology, EPA 600/2-74-001 (1974) 112.

LOS RIESGOS RESPECTIVOS DE LAS DIFERENTES FUENTES ENERGETICAS

- [30] Kaman Aerospace Corporation, "Design Study of Wind Turbines 50 kW to 3000 kW for Electric Utility Applications - Analysis and Design", preparado para la NASA, Bloomfield, CT (Febrero de 1976).
- [31] Holdren, J.P., Anderson, K., Glenck, P.H., Mintzer, I., Morris, G., Smith, K.R., "Risk of renewable energy sources: a critique of the Inhaber report", Energy and Resources Group, University of Berkeley, Berkeley, California ERG 79-3 (1979); Morris, G., 'Problems and Pitfalls in the Environmental Assessment of Energy Systems', En: Conference on Health Effects of Energy Production, patrocinado por Chalk River Nuclear Laboratories, Ontario, Canada (12 a 14 de septiembre de 1979) (en prensa).
- [32] Bureau of Labor Statistics, "Occupational Injuries and Illnesses in the United States by Industry, 1978". Estadísticas inéditas, en preparación. Bureau of Labor Statistics, US Department of Labor (1980).