

LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL A ESCALA PLANETARIA.

EL COSTE FÍSICO DE REPOSICIÓN DEL «CAPITAL MINERAL» DE LA TIERRA.

ANTONIO VALERO
AMAYA MARTÍNEZ

Centro de Investigaciones de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE)
Universidad de Zaragoza

EDGAR BOTERO

Grupo de Energía y Termodinámica
Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

EL CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA PER CAPITA DE UN EUROPEO OCCIDENTAL ES APROXIMADAMENTE DE 3,22 TONELADAS EQUIVALENTES DE PETRÓLEO (TEP) POR AÑO. CON ESTA ENERGÍA PODRÍAMOS RECORRER UNOS 40.000 KILÓMETROS

77

en automóvil, y pagada al precio de barril de crudo supone unos 660 euros/año. Estos números no son valores aparentemente elevados. Sin embargo, si tuviéramos que almacenar todo el anhídrido carbónico que producimos, tendríamos que disponer de un volumen equivalente a 1.500 m³ de vivienda cada año. La energía mueve el mundo y sin embargo su valor medido en términos monetarios es netamente inferior a sus costes físicos, como son el agotamiento de recursos no renovables, el impacto, sobre la salud y el clima, de las emisiones producidas en su uso, transporte y transformación, y la destrucción progresiva

y sistemática de los biotopos naturales de donde se extraen los combustibles fósiles.

Consumimos unas 30 veces más energía que la que realmente necesitamos para las actividades estrictamente biológicas. Ni a lo largo de la historia ni en toda la geografía mundial ha sido ésta la pauta. Si los antiguos romanos tenían esclavos que les servían, hoy tenemos el equivalente a 30 esclavos mecánicos que nos transportan, alimentan, nos protegen del frío o del calor, nos dan seguridad, nos informan y nos defienden. El cristianismo abolió la esclavitud. ¿Podremos en el fu-

turo paliar al menos la esclavitud mecánica a la que hemos sometido al mundo natural?. En los últimos treinta años el uso global de la energía ha aumentado casi un 70%. Crece a mayor ritmo que la riqueza o la población, en más de un 2% anual desde la crisis del 1973 y, si siguen las tendencias actuales, este ritmo continuará en los próximos quince años.

Nuestra sociedad está asentada en la ineficiencia energética y material porque la naturaleza no parece reclamarnos nada y no entiende de dinero sino de acciones y reacciones. Al aumentar el número de per-

sonas y las utilidades que hemos querido extraer de la tierra, las perturbaciones que estamos infringiendo ya son enormes. La destrucción de la capa de ozono, el cambio climático global, la contaminación de la atmósfera y de los mares, la desaparición de la biodiversidad o la destrucción de los bosques tropicales son algunas, y no existe ningún gobierno ni acuerdo global por el cual se realice una compensación física a la naturaleza. Suena incluso extraño reclamar esto, porque no entendemos más que de dinero. Tendemos a asociar la palabra «medioambiental» con limpieza: una atmósfera y ríos limpios y una tierra sin desechos visibles, es decir, unos vertederos controlados, se consideran protección medioambiental.

En cambio nos olvidamos que las auténticas perturbaciones vienen del lado de la cantidad más que de la calidad. Millones de toneladas de materiales extraídos de la naturaleza y transformados que al final devienen en residuos. Ríos desviados de su cauce y retenidos, millones de toneladas de tierra erosionada, millones de toneladas de gases arrojados a la atmósfera, zonas boscosas del planeta arrasadas por incendios, etc. Todo esto sí que constituye las auténticas perturbaciones sobre el planeta.

Las sociedades primitivas asociaban la riqueza a lo que su entorno les daba. Un año lluvioso o la ausencia de catástrofes naturales implicaba una prosperidad inmediata. Una mala gestión de las tierras implicaba la ruina segura. Proteger y protegerse de la naturaleza era el punto clave de la riqueza. Conforme el ser humano se va alejando de la naturaleza, ya no tiene que luchar contra los elementos, y éstos le afectan más remotamente. El efecto de sus deseos no lo ve reflejado en el impacto ambiental que éstos generan, así que mientras exista alguien que esté dispuesto a satisfacerlos a cambio de dinero, la moderación en los deseos atenderá a razones económicas y no a razones naturales. Al alejarnos, hemos perdido esa sabiduría humana que nos indicaba cuáles eran los límites de explotación del entorno que nos permitía sobrevivir de una forma sostenible con él.

Hoy somos incultos y, lo que es peor, no queremos saber. Conocer el impacto de



nuestras actividades más cotidianas sobre la madre natura se ha convertido en algo tabú. No vale la pena conocer el horror y lo desagradable. Ya pagamos por los servicios que nos venden pulcros y exentos de culpa. Es como si cada vez que comemos carne tuviéramos que ver al animal siendo sacrificado, con la sangre, el dolor y con el conocimiento de todos los detalles del «proceso» que ha llevado al animal desde el establo hasta la mesa. Esa sabiduría del cazador que pide perdón a Dios —a la Naturaleza— y al animal porque le permite sobrevivir un día más, ha desaparecido en nuestra sociedad. La carne viene asépticamente envuelta en una bandeja de plástico, congelada y libre de responsabilidades. No queremos saber cuántos litros de petróleo, cuánto forraje, cuántos fertilizantes, cuánto impacto ambiental, en suma, han sido necesarios para convertir ese producto natural en algo comestible. La cantidad de energía, espacio y materiales que tenemos que remover es cada vez mayor, pero cada vez existen más empresas, organismos y Estados interpuestos que diluyen nuestra responsabilidad como consumidores finales.

Schmidt-Bleek describe que un yogur de fresa en Europa habrá recorrido unos 8.000 Km antes de llegar al frigorífico del consumidor. Ello ha sido necesario para la fabricación del envase de plástico, la tapa de aluminio, la leche, las fresas o los

estabilizantes químicos, pero sin contar los desplazamientos originados por las vacas, ni fertilizantes para producir las fresas, ni tan siquiera el desplazamiento de la basura que generamos una vez comido el yogur.

La globalización está favoreciendo esos desplazamientos. Las técnicas del empaquetamiento se han convertido en los últimos cuarenta años en una forma muy sofisticada de venta. Las razones más primarias del envoltorio, como son la seguridad física o la higiene, quedan atrás y, en muchos casos, el continente es más caro que el contenido, que se prestigia gracias a su presentación, y la energía necesaria para transportar el material consume más en los envoltorios que en la mercancía vendida. Fabricar los envoltorios requerirá producir y transportar papel, cartón, madera, plástico, vidrio, acero o aluminio, que habrán necesitado enormes cantidades de energía para su producción.

Las empresas necesitan vender sus productos y cuanto más vendan mejor irá la economía, más puestos de trabajo y mejor remunerados. Por otra parte, al existir más oferta en el mercado, los precios disminuyen por el efecto de la competencia y se estimula la creatividad, apareciendo nuevos productos y servicios que mejoran los anteriores dejándolos rápidamente obsoletos. La extensión global de las comunicaciones, la televisión, la radio, el cine, Internet y el teléfono están omnipresentes y muestran un tipo de sociedad en la que el modelo es el de la sociedad occidental. Es un modelo idealizado, en el que las casas son mayores y están construidas de cemento, acero, madera y vidrio, más automóviles, más superficie ocupada, más calefacción y aire acondicionado, vestidos a la última moda que hay que cambiar cada temporada, alimentos exóticos bien preservados y traídos de todas partes del mundo. Y no existe ningún rincón del planeta donde no se pueda ir de vacaciones, ni por supuesto adquirir una segunda residencia.

Por otra parte, la publicidad transmite los más bellos mensajes para conseguir que compremos los productos que fabrican las empresas que nos dan trabajo para tener dinero para comprar los pro-

cional de la Energía, el uso de la energía se ha disparado en los últimos años, a medida que se ha ido extendiendo la economía de tipo industrial, y este rápido crecimiento se espera que continúe en las próximas décadas. El Instituto de Recursos Mundiales vaticina que el uso de la energía se habrá incrementado en un 40% entre 1993 y 2010.

Y esta predicción se hace incluso contando con las ventajas de eficiencia aportadas por las nuevas tecnologías, ya que en los próximos decenios este crecimiento aumentará sobre todo en los países en vías de desarrollo, que anularán con creces el efecto de las tecnologías eficientes mayoritarias en los países más desarrollados (WRI, 2000). Los efectos sobre el clima y la salud se harán notar, en consecuencia, con estos datos.

¿RAÍCES TERMODINÁMICAS DEL CONSUMO ENERGÉTICO?

El consumo energético no constituye un fin en sí mismo, simplemente satisface una demanda centrada en las utilidades que deseamos adquirir. Cuanto más voluminosas sean, más energía necesitarán para llegar a nuestras manos.

La termodinámica o, como Rankine la llamó, energética, nos enseña que el trabajo es igual a una fuerza por un desplazamiento. A mayor masa a desplazar o a mayor desplazamiento, mayor será la energía consumida. También la termodinámica enseña que cuanto mayor sea el número de procesos intermedios en una transformación, mayor será el consumo energético, y ello, aunque cada subproceso sea muy eficiente. Dividir una actividad en muchas subactividades puede ser muy eficaz desde el punto de vista organizativo, pero no tiene por qué serlo desde el punto de vista energético.

Si unimos las anteriores observaciones tenemos algunas de las claves del elevado consumo energético de nuestra sociedad. Si la energía es barata, el traslado de materiales a larga distancia no resulta oneroso. No es raro ver que en Nueva York se vendan tulipanes producidos en Holanda

que viajan haciendo escala en Moscú, ya que la compañía Aeroflot es más barata. Tampoco es extraño comprar en Estados Unidos agua mineral embotellada en Francia, cuya idéntica composición química podría salir más barata si se fabricara en Estados Unidos a partir de las sales puras y el agua destilada, y éstas compradas a precio de mercado. A eso se le llama el poder de las marcas...

El comercio internacional tiene lugar en tanto exista un *desplazamiento de materiales y mercancías*, y con ellos su empaquetamiento y embalaje se han convertido en los últimos cuarenta años en una forma muy sofisticada de venta. Se embala para proteger la mercancía de golpes, o de agentes externos; se envuelve para conservar las propiedades organolépticas y se empaqueta para prestigiar una marca y hacer publicidad del producto. Las razones más primarias del envoltorio, como son la seguridad física o el robo, quedan atrás, y en muchos casos, el continente es más caro que el contenido, que se prestigia gracias a su presentación.

La imagen y el coste de la imagen se compensan ampliamente con el margen de la venta, y la energía necesaria para transportar el material se consume más en los envoltorios que en la mercancía vendida. Fabricar los envoltorios requerirá producir y transportar papel, cartón, madera, plástico, vidrio, acero, aluminio, etc., que a su vez habrán sido fabricados y transportados desde innumerables partes del globo, y habrán necesitado enormes cantidades de energía para su producción. La energía física del transporte de mercancías ha aumentado y va a seguir aumentando con la globalización y la deslocalización de los diferentes procesos manufactureros que integran un producto final.

La energía química de separación y de reacción aún desempeña un papel más importante que la energía consumida en los transportes. Nuestra sociedad no sabe apreciar el esfuerzo energético tan enorme que significa separar. Para trasladar necesitamos motores que conviertan la energía química en energía cinética y estos motores nunca tienen un rendimiento superior al 25%, lo que hace que el pro-

ceso completo nunca supere el rendimiento de un 10% o 15% de la energía del combustible utilizado. En cambio, separar es un proceso altamente ineficiente, da igual que sea para la separación de sólidos de sólidos, sólidos de líquidos, líquidos de líquidos, gases de líquidos o gases de gases, se necesitan técnicas que hacen uso masivo de la energía y de disolventes, particularmente el agua. Entre estos procesos se cuentan la destilación, la flotación, la filtración, la disolución y extracción de líquidos, la absorción y adsorción de gases y algunas más.

Todas estas técnicas tienen en común que si mezclar no desprende energía, el proceso inverso de desmezcla lleva aparejado cientos o miles de veces más consumo energético. Y el fenómeno mezcla-separación está omnipresente en todas las actividades cotidianas. Así, la minería es un proceso de separación principalmente entre sólidos. Por ejemplo, la minería a cielo abierto de extracción del carbón mueve más de 10 t de materiales inertes por cada tonelada de lignito extraída. Toda la industria del petróleo basa sus elevados consumos energéticos en la separación de sus componentes como GLP, gasolinas, gasóleos, asfaltos, etc. La naturaleza no provee los minerales, las rocas, el agua, ni los combustibles, en estado de uso industrial, lo que significa separarlos de sus componentes naturales y purificarlos.

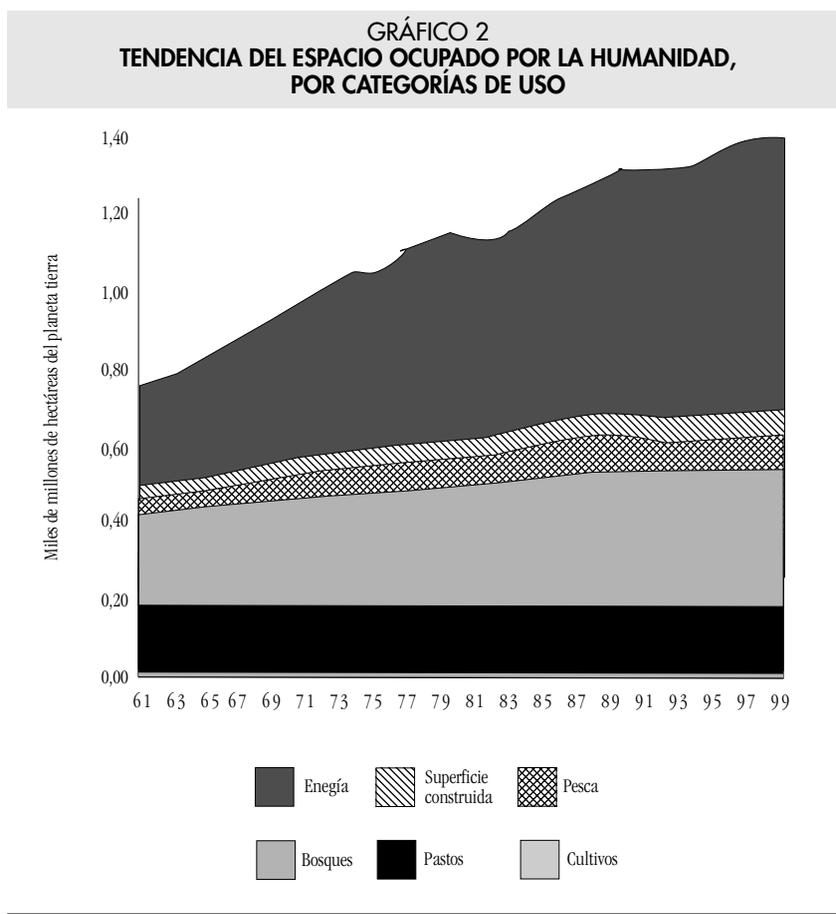
Esos primeros estadios físicos son profundamente consumidores de energía y, lo que es más dramático, la energía necesaria para separar un componente de una disolución (sólida, líquida o gaseosa) tiende a ser proporcional al inverso de su concentración. Es decir, que separar un componente en una concentración al uno por mil cuesta al menos diez veces más energía que si éste está al uno por ciento, y, a su vez, éste cuesta al menos diez veces más que si lo está al diez por ciento. Lo irónico es que la termodinámica nos dice que la energía de separación mínima es igual a la que da el componente al mezclarse, lo que significa que la ineficiencia de estos procesos es enorme. Aquí la nanotecnología y la biotecnología deben desempeñar un papel primordial en el futuro. Si existen bacterias capaces de separar se-

lectivamente metales y sustancias químicas, deberían ponerse en servicio, en aras a bajar radicalmente los consumos energéticos asociados a la separación. De la misma manera, en el futuro, la nanotecnología y la industria informática pueden ser clave en la selección y separación inteligente de componentes en mezclas.

No obstante, si la interfase naturaleza-materias primas desempeña un papel crucial en el consumo de energía, no menos importante es la interfase desechos-naturaleza. Nuestra sociedad maneja miles de toneladas de materiales que después de pocos ciclos de uso se convierten en desechos, basuras, emisiones al agua y a la atmósfera. Son también procesos irreversibles de mezcla que contaminan y polucionan el suelo, la hidrosfera y la atmósfera. Y ante este fenómeno generalizado sólo tenemos, en el largo plazo, dos alternativas: evitar la mezcla o separar lo mezclado. La última se denomina, tecnología «final de la tubería» y es la más generalizada. Se trata de evitar emisiones lavando gases, depurando aguas residuales, incinerando basuras, etc. Las regulaciones medioambientales tratan de limitar las emisiones y nunca inciden en sus auténticas causas.

Cuando se ha mezclado, y el proceso de contaminación es esencialmente un proceso de mezcla, se necesita gran cantidad de energía para separar. Es mejor evitar el proceso de separación simplemente evitando la mezcla. Reutilizar los materiales y diseñarlos robustos para que sus ciclos de uso se multipliquen es más importante que reciclar o simplemente disponerlos en un vertedero por muy controlado que esté. El despilfarro de materiales y de agua es, en última instancia, un despilfarro aun mayor de energía y por tanto, de acciones agresivas a la naturaleza. En el proceso de purificación y esterilización se consumen energía y, productos químicos que han necesitado energía para ser obtenidos, y en el proceso de depuración vuelve a consumirse energía para limpiar un agua que en una gestión racional podría no haberse necesitado.

La sociedad necesita energía para su desarrollo, pero el desarrollo no tiene por qué implicar un despilfarro de energía. En cualquier proceso productivo se podrá o



FUENTE: Wackernagel et al, 2002.

no «gastar» materiales y agua, pero lo que es seguro es que se consumirá energía, y ese consumo energético llevará asociado un impacto medioambiental cierto.

La tercera vía de despilfarro energético es la *energía química de reacción*. Los materiales más utilizados por la sociedad son justo aquéllos en los que se necesita más energía para producirlos. Por citar sólo cinco fundamentales: acero, aluminio, cemento, vidrio y plásticos. Los metales, salvo los preciosos, no aparecen puros en la naturaleza, sino en forma de óxidos. Tanto el óxido de hierro como el de aluminio, es decir, bauxita, deben ser reducidos y para ello se necesitan enormes cantidades de energía de origen térmico, eléctrico, o de ambos. El cemento en su producción necesita ser calcinado, y para el vidrio debe fundirse la arena silíceo. El plástico es petróleo directamente transformado.

En todos estos procesos, el consumo de energía por unidad de masa de material

producida es muy elevado. Sin embargo, su coste económico resulta despreciable en comparación con cualquier producto manufacturado. Escasamente se empieza a tener conciencia de que un envase de plástico o una lata de acero o de aluminio o una botella de vidrio son elementos valiosos independientemente de que podamos o no pagarlos y que el reciclaje de estos productos no se hace por el retorno económico que nos den por ellos, sino por una conciencia medioambiental que sentimos que no se paga.

Si la producción energética asumiera todos sus costes sería mucho más cara. Y de la misma forma que en los últimos doscientos años la productividad laboral de las empresas se ha multiplicado por más de 50, es el momento de reclamar que la productividad de la energía se mejore notablemente en este siglo XXI. Es una falacia decir que siempre existirá energía, de una u otra forma, que acompañará al hombre en su desarrollo y que por tanto

ral conservado es bello. Queremos ciudades con árboles y parques, y a no muchos kilómetros de nuestra casa, disponer de entornos naturales bellos y bien cuidados. Pero no se ahonda en las raíces del problema de la degradación. Lo lejano no está dentro de nuestras preocupaciones. Pareciera que los gobiernos de los países o la falta de acuerdos internacionales fueran los responsables en última instancia de problemas que no nos afectan cotidianamente y de los que sólo tenemos noticias a través de la prensa y de los medios de comunicación.

Pero el planeta es uno y único y no puede contemplarse la degradación del medio ambiente como un problema que consista en poner las leyes suficientes y hacerlas cumplir; ni podemos dejar al mercado que sea el que, en última instancia, ponga a disposición de los consumidores todas las materias primas, agua y materiales que puedan pagar, teniendo en cuenta que nadie paga a la naturaleza por los costes de degradación que le infligimos. Ni la escasez de materia primas ni el daño medioambiental son problemas separados y constituyen aspectos de un problema común, cual es, que nuestros modos de desarrollo están basados en el uso intensivo y despilfarrador de los recursos naturales. La energía es simplemente el combustible que mueve el proceso que convierte los materiales en desechos.

Un análisis de cuál es el capital mineral de la Tierra es fundamental para conocer cuál es el estado actual de nuestras cuentas con el planeta. Saber cuánto tiene y cuánto le debemos es crítico para una buena gestión de la Tierra y también para saber qué se podría hacer con dicho capital y qué no. Tomar conciencia de que dicho capital es finito y mensurable ayudará a reflexionar en la dirección de una economía nueva que integre la gestión del planeta como parte inseparable de nuestros deseos por adquirir y consumir más cosas junto con el derecho de todo ser humano a desarrollarse social y personalmente.

En esta tarea contable no solamente cuentan los combustibles fósiles sino todos los minerales y materiales de la Tierra, incluidos el agua y el aire. Además,



no pueden verse los recursos como algo sólo a poner en la cuenta del haber, ya que si cada vez que los utilizamos estamos generando un daño a la naturaleza, bien sea por la combustión, o bien por la remoción de tierras que causa la minería, habrá que descontar el debe del impacto medioambiental que causa su uso.

Por otra parte, una contabilidad racional exige que todos los asientos aparezcan en las mismas unidades, lo que añade una mayor complicación a la tarea. En efecto, estas unidades no pueden ser monetarias, ya que no sabemos cuál será el valor a muy largo plazo —o poder de adquisición— de cualquier moneda que utilicemos. Las contabilidades monetarias valen para intervalos temporales relativamente cortos desde el punto de vista histórico, porque los cambios sociales son tan considerables en el largo plazo, que hacen inútiles todas las cuentas. ¿Quién actualizaría hoy una cuenta en sextercios o en doblones si no fuera por pura curiosidad? La moneda tiene valor dentro de un contexto histórico y dentro de una sociedad que quita y pone valor a las cosas. Las guerras y las revoluciones han destruido imperios, modos de vida y esquemas sociales que un día se creyeron eternos.

¿Cómo es posible que le pidamos al sistema financiero un determinado interés

por nuestro dinero de forma *permanente*? Por ejemplo, pedir un 2% anual por encima de la inflación a nuestro dinero significa que en 34,6 años habremos duplicado nuestro poder adquisitivo. Si la riqueza de la población se basa en última instancia en el poder de adquisición de bienes materiales que necesitan energía y materias primas para su obtención, es evidente que duplicar el poder de consumo de la humanidad entera dentro de 35 años significaría que a iguales tasas de uso de recursos naturales (es decir un 2% de tasa de aumento de extracción anual), éstos habrán disminuido a la mitad de los actuales y la gente tendría el doble de capacidad de adquisición que la actual para adquirir más bienes materiales.

Estos mismos cálculos extendidos a períodos más largos conducen a absurdos lógicos, en los que se ve claramente que ni la moneda dentro de cien años —aun descontada su inflación— tendrá el mismo poder adquisitivo que el actual, es decir, el espectro de cosas que se podrán comprar, ni la sociedad podrá sostenerse con tan elevados consumos unitarios de materiales y energía como los actuales. Queda por ello demostrado que, un análisis intemporal de los recursos del planeta no tiene sentido medirlo en unidades monetarias, ni pasadas, ni actuales, ni por supuesto futuras.

más adelante. De otra parte, el término $E_{\text{min}_{\text{conc}}}$ es la energía mínima que se requeriría para concentrar el mineral desde la concentración en la cual se encuentra en la corteza terrestre (X_c) hasta la concentración en la mina (X_m), y ésta representa el esfuerzo físico (expresado en términos energéticos) que nos evita la naturaleza al brindarnos las minas como una circunstancia excepcional dentro de la misma.

El segundo componente del valor termodinámico de un mineral se debe a su exergía química y que se puede calcular mediante la expresión:

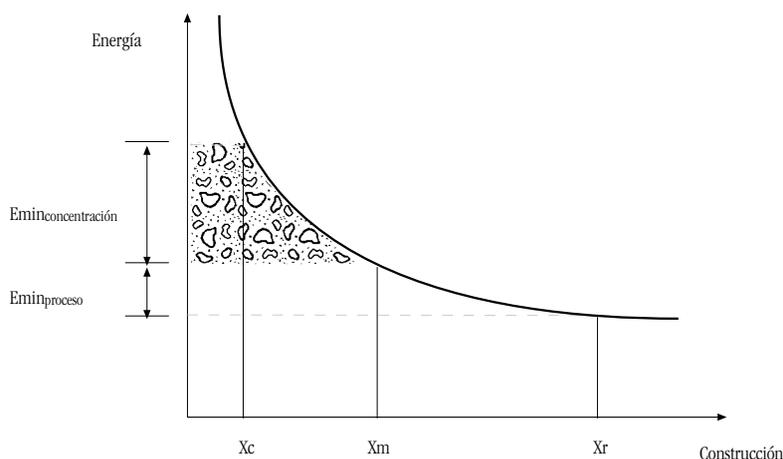
$$b_{\text{qca}} = \sum v_k b_{\text{qk}}^0 + \Delta G_{\text{mineral}}$$

donde v_k son el número de moles del elemento k del compuesto, b_{qk}^0 es la exergía del elemento k en el ambiente de referencia y $\Delta G_{\text{mineral}}$ es la energía libre de Gibbs del mineral a partir del cual se obtiene el elemento de manera comercial. El ambiente de referencia es una convención que representa la situación más degradada, desde el punto de vista termodinámico, a la cual llegaría el planeta si se utilizaran y dispersaran todos sus recursos naturales, es un ambiente en el que no existen potenciales físicos ni químicos.

Varios autores han propuesto ambientes de referencia para el cálculo de las exergías física y química de las sustancias; para la primera es suficiente con fijar el valor de la presión, la temperatura y la altura que se considera como nivel cero, en el segundo caso, y para considerar un ambiente de referencia general, es necesario definir la composición de éste teniendo en cuenta que debe estar en equilibrio termodinámico (no existir diferencias de potencial) y no contradecir los valores intuitivos de exergía, los cuales dan una medida del valor de la escasez de los recursos desde una perspectiva termodinámica. Para realizar la valoración exergética de los recursos minerales se ha elegido un ambiente de referencia lo más parecido posible al ambiente físico real y que mejor concuerda con las condiciones actuales de composición de la corteza terrestre.

La segunda ley de la termodinámica permite calcular las energías mínimas requie-

GRÁFICO 3
REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS PARA LA CONCENTRACIÓN



FUENTE: Valero, 1999.

ridas para reponer un recurso desde su condición más degradada o, de manera inversa, la energía máxima que se puede obtener si se aprovecha completamente el desequilibrio físico y químico del recurso por medio de un proceso ideal o reversible. Sin embargo, los procesos reales diseñados por el hombre se alejan de la condición ideal y los requerimientos energéticos para obtener un recurso son siempre mayores que lo estipulado por la segunda ley; por ello, si se valoran los recursos naturales teniendo en cuenta únicamente procesos reversibles, se estarían dejando de lado las limitaciones tecnológicas que hacen a éstos más costosos o menos útiles de lo que realmente lo son para el hombre.

Por esta razón es necesario incluir en la valoración termodinámica de los recursos los costes físicos reales, los cuales se definen como la relación entre la energía invertida en el proceso real de obtención del recurso y la energía mínima requerida por el mismo proceso calculada razonando como si éste fuera reversible. De esta forma, el valor termodinámico real de un recurso está determinado por su exergía multiplicada por el coste físico real del proceso de obtención respectivo. Llamaremos coste exergético de reposición a este nuevo concepto.

En el caso del agua, este recurso tiene utilidad por sus condiciones de pureza

(composición) y por su desequilibrio potencial, que permite obtener trabajo a partir de ella. Ya varios autores han propuesto modelos físicos que permiten determinar el valor termodinámico de un río, y realizar cuentas físicas y económicas para valorar los recursos de agua de una país o región, no obstante la utilidad de estos modelos, su aplicación en una visión global del recurso se hace poco práctica dada la cantidad de información que es necesaria para poder obtener resultados concretos.

Por esta razón, se propone valorar los recursos de agua del planeta por su coste exergético de reposición, el cual se define como «la mínima cantidad de energía que sería necesario disponer para devolver el recurso a las condiciones físicas y químicas con las cuales lo entregan las funciones de los ecosistemas, utilizando para ello la mejor tecnología disponible». Este concepto es aplicable para el caso de cualquier recurso renovable y no sólo para el caso del agua; es una forma de calcular el coste físico que tendría suplir alguna de las funciones de los ecosistemas, en este caso el ciclo hidrológico, pero al mismo tiempo permite determinar el coste físico marginal que tendría producir una unidad más del recurso a las que ya provee la naturaleza.

Desde un punto de vista termodinámico, la condición más degradada que puede

alcanzar el recurso agua es el océano, y por lo tanto es a partir de allí desde donde habría que reponerlo. Al igual que en el caso de los minerales, el valor termodinámico del agua tiene dos componentes: el primero representado por la energía mínima (exergía) para devolver la condición de composición del recurso, es decir para llevar a cabo el proceso de desalación, que está dado por la expresión:

$$b_{\text{desalación}} = nRTx_1$$

donde n es el volumen molar parcial del solvente en la solución, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura absoluta y x_1 es la fracción molar de sal a la entrada del proceso. Esta expresión permite calcular la mínima energía necesaria para operar una planta de desalación de manera reversible y que equivale a la máxima energía que se podría obtener si se operara la planta en forma inversa.

El segundo componente del coste de reposición de los recursos de agua, es la energía mínima necesaria para llevar de nuevo el recurso hasta la altura con respecto al nivel del mar, en la cual lo entrega el ciclo hidrológico. Dicha exergía se puede calcular como:

$$b_{\text{física}} = 9,8Qh$$

donde Q es el caudal volumétrico de agua y h es la altura a la cual habría que devolver el recurso; esta energía es la mínima que habría que invertir para bombear un caudal de agua dado hasta un lugar con una altura específica, y, al mismo tiempo, es la máxima cantidad de energía que podría obtenerse si se transformara la exergía potencial del recurso en trabajo de eje, utilizando para ello un proceso reversible.

Para los *combustibles fósiles* también es posible plantear un coste de reposición del recurso; dicho coste está determinado por el rendimiento energético del proceso de la fotosíntesis el cual tiene una eficiencia energética que varía entre el 0,3%, en el mejor de los casos, y el 0,023%, como valor medio para todo el planeta. De acuerdo con esto, el coste físico aproximado de reponer cada unidad de energía fósil que se utiliza actualmen-



te varía en el rango entre 300 y 5.000, con lo cual el valor termodinámico de las reservas de estos recursos estaría entre $244 \cdot 10^6$ y $4,07 \cdot 10^9$ Mtep, y la única fuente energética de que se dispone para pagar dicho coste es la energía solar contando para ello con la mejor «tecnología natural» para llevarlo a cabo, que es la fotosíntesis. Estas cifras dan cuenta de la imposibilidad para intentar reponer los combustibles fósiles a través de la biomasa y por ello se propone seguir una valoración termodinámica tradicional basada en el poder calorífico superior (PCS), el cual es equivalente a la exergía del combustible, pero valorando de manera anticipada la externalidad ambiental asociada a su uso.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone valorar el capital natural limpio (CNL) contenido en los combustibles fósiles, como aquella reserva energética de la cual ya se ha descontado la energía necesaria para llevar a cabo el abatimiento de las emisiones que causa su uso hasta niveles en los cuales no afecten el medio ambiente. La expresión que permite calcular el capital natural limpio es:

$$\text{CNL} = \sum R_i [\text{PCS}_i - \sum (\text{FE}_i \times \text{CE}_x \text{A}_i)]$$

donde R_i es la reserva del combustible i (petróleo, carbón o gas natural), PCS_i es el poder calorífico superior del combusti-

ble i , FE_i es el factor de emisión del contaminante i , de acuerdo a la tecnología en la cual se lleva a cabo la transformación primaria del combustible, y $\text{CE}_x \text{A}_i$ es el coste exergético de abatimiento, el cual se define como «la energía necesaria para evitar las emisiones causadas por el uso de combustible, utilizando para ello la mejor tecnología disponible».

Esta propuesta permite internalizar anticipadamente el coste ambiental asociado al uso de las reservas de combustibles fósiles existentes en el planeta; adicionalmente es una valoración objetiva de la externalidad basada en criterios físicos. Se propone expresar el capital natural limpio por medio de una nueva unidad de medida de energía contenida, denominada tlep (toneladas limpias equivalentes de petróleo), que corresponde a la cantidad de energía contenida en un combustible que es posible utilizar sin detrimento significativo de las condiciones medioambientales locales o globales.

SÍNTESIS DE RESULTADOS

Se han aplicado los modelos planteados arriba para realizar una primera aproximación al valor físico de estos componentes del capital natural. En el caso de los minerales se ha realizado un inventario que incluye 42 recursos, donde están los principales metales y algunos de los más importantes minerales, para los cuales, con base en diferentes fuentes estadísticas, se determinaron los datos de reservas y producción, las principales sustancias que son fuente económica de los metales y minerales incluidos en el inventario, la concentración límite que permite explotarlos de manera económica, las características de los procesos de extracción y los costes físicos reales asociados a sus procesos de extracción.

En la obtención de los recursos minerales existen dos procesos bien diferenciados; el primero es de concentración y el segundo de refino. Por esta razón existe un coste físico real para cada uno de ellos. En el caso de la concentración, este parámetro se determina como la relación entre la energía real utilizada en esta etapa del proceso y la exergía de concentración entre las condiciones de la mina y la con-

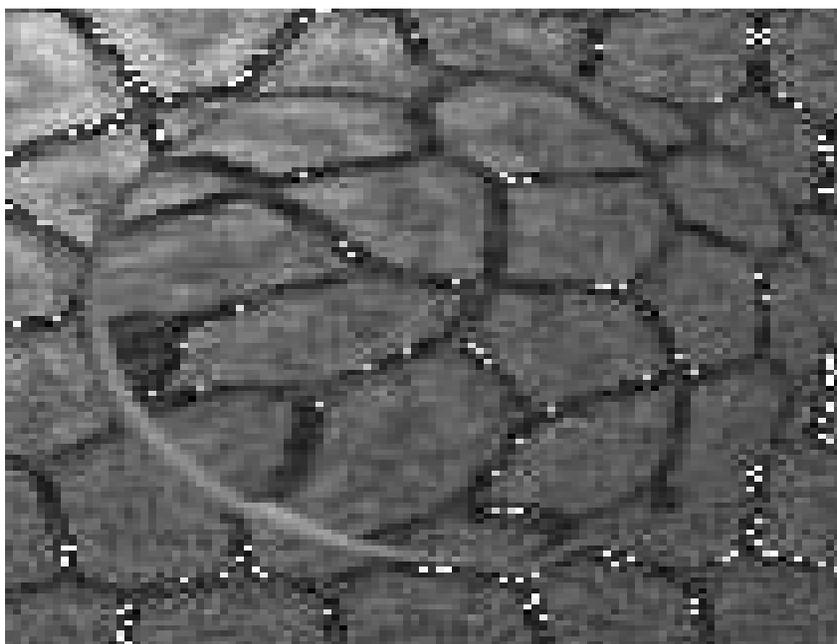
concentración antes del proceso de refinación ($E_{\text{min}_{\text{proceso}}}$); para el caso de refino el coste físico se determina teniendo en cuenta la energía real invertida en este segundo proceso y la entalpía de formación o energía libre de Gibbs del mineral a partir del cual se obtiene el elemento.

Para 36 de los 42 recursos minerales, y con base en diferentes referencias especializadas, se determinaron los costes físicos reales tanto para los procesos de concentración como para los procesos de refinación de los minerales. En el primer caso, los costes físicos de concentración (k_c) varían entre uno para el caso del magnesio, el cual se obtiene principalmente a partir del agua de mar y no requiere un proceso previo de concentración, hasta valores que superan los 400.000, para el caso del oro. Para los metales más comunes, como el aluminio, el cinc, el cobre, el hierro, el níquel, el plomo y el titanio, se determinaron costes reales de concentración de 396, 63, 386, 44, 337, 212 y 348, respectivamente.

El coste físico de refinación (k_r) de los metales y minerales es, en la mayoría de los casos, menor que el coste físico de concentración. En los casos, por ejemplo, del aluminio y del hierro, los valores de k_r son de 7,8 y 4,2, respectivamente, en comparación con los valores de k_c , de 396 y 44 respectivamente. Para la mayoría de los minerales considerados, el coste físico del proceso de refino se ubica en el rango entre 1 y 100.

Estos valores de costes físicos reales dan cuenta del alejamiento en el que se encuentran los procesos reales de explotación de los minerales de la condición ideal, es decir, si se valoraran los minerales desde la perspectiva de segunda ley sin considerar el factor de desarrollo tecnológico, se tendrían, en la mayoría de los casos, valores que serían varios órdenes de magnitud menores y se estaría subvalorando la riqueza mineral del planeta.

De acuerdo con los resultados obtenidos al aplicar la metodología expuesta a las reservas de los minerales incluidos en el inventario realizado, el componente de concentración del capital natural representado en éstos equivale en términos físicos a 22.014 Mtep, teniendo



do en cuenta que las reservas mundiales probadas de petróleo ascienden a 150.692 Mtep, este componente del capital natural equivale al 14,6% de la riqueza natural energética representada en las reservas de dicho combustible. Por otra parte, el nivel de explotación de los minerales analizados hace que cada año se gasten irrevocablemente 272 Mtep del capital mineral debido a su condición de concentración; esto supone una velocidad de consumo del 1,02% cada año, valor un 50% menor a lo que sucede con las reservas de petróleo, las cuales se consumen a una velocidad del 2,3% por año, pero que está más próximo de lo que se pensaría inicialmente.

El segundo componente del capital mineral, el valor termodinámico de los minerales por su composición, es de 1.252,6 Mtep, valor que equivale a un 0,83% de las reservas mundiales de petróleo. Con respecto al valor total calculado para la concentración, el componente químico equivale a un 5,7% de la misma. Teniendo en cuenta la producción alcanzada para cada uno de los minerales incluidos en el inventario realizado, cada año se consume el equivalente a 35 Mtep de la riqueza mineral debida a la composición de los principales minerales, lo cual equivale al 1% del consumo mundial de petróleo alcanzado en 1997.

En resumen, el capital natural representado en las reservas de los minerales evaluados equivale a 23.267 Mtep, y el ritmo anual al que se consume este capital es de 307 Mtep (1,3% por año).

En el caso del *agua*, para calcular el coste de reposición del recurso se utilizó uno de los inventarios más recientes sobre cantidad de recursos existentes en el planeta, de acuerdo con esta referencia, el ciclo hidrológico evapora cada año 577.000 km³ de agua, de esta cantidad, 502.800 km³ (87%) se evaporan desde la superficie del océano y los restantes 74.200 km³ se evaporan desde los continentes. Esta misma cantidad de agua se precipita nuevamente sobre el planeta, pero distribuida de manera diferente, 458.000 km³ sobre los océanos y 119.000 km³ sobre los continentes; la diferencia entre la evaporación y las precipitaciones en los continentes representa el agua total en los ríos (42.600 km³/año) y el flujo de agua subterránea hacia los océanos (2.200 km³/año). Estos últimos valores, que se consideran como la parte renovable del recurso, son los que podrían llegarse a utilizar aunque, desde un punto de vista técnico, sólo son disponibles unos 7.500 km³/año, de los cuales ya se utiliza un 40% aproximadamente.

El coste mínimo de reposición, es decir, considerando el proceso de desalación

reversible, sería de 2.599 Mtep/año, sin embargo, los procesos de desalación reales requieren cantidades de energía que son entre 16 y 116 veces superiores a la energía mínima de desalación, dependiendo de la tecnología utilizada. La más eficiente de éstas, desde el punto de vista energético, es la osmosis inversa (RO), con la cual, si se tuviera que reponer la calidad de los recursos renovables de agua del planeta, se tendría un coste físico equivalente a 43.798 Mtep/año.

Como ya se ha dicho, el valor termodinámico de los recursos renovables de agua del planeta también debe tener en cuenta la energía necesaria para devolver al recurso sus condiciones de desequilibrio potencial que permiten aprovecharlo para la producción de trabajo. Desde el punto de vista de segunda ley, la energía mínima necesaria para reponer el recurso es igual a la máxima energía que se obtendría si se aprovechara su diferencia de altura con respecto a la misma referencia, por ello, y teniendo en cuenta la disponibilidad de información relacionada con los potenciales hidroeléctricos mundiales discriminados por países, se calculó el segundo componente del coste de reposición de los recursos renovables de agua en el planeta como la cantidad de trabajo que, con las limitaciones tecnológicas actuales, es posible obtener a partir del recurso a escala global.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la capacidad hidroeléctrica potencial técnica que existe en el planeta es de 3.009 Gwe, y la generación potencial técnica de energía que podría alcanzarse sería de 11.586.686 GWh/año, equivalentes a 993 Mtep/año (considerando una operación media de la capacidad técnica de 3.851 horas por año, lo cual equivale a un factor de utilización del 44%).

De acuerdo con lo anterior, el coste energético de reposición (CE_{xR}) de los recursos hidráulicos renovables de la tierra varía entre un valor mínimo de 3.592 Mtep/año y un valor razonable de 53.304 Mtep/año; es decir, tendría que disponerse de esta energía primaria, adicional a la que hoy ya se consume, para llevar a cabo parte de los servicios del ciclo hidrológico, en el caso hipotético de que éste dejara de realizar su función en la forma



en que lo ha venido haciendo hasta ahora. Teniendo en cuenta que el consumo de energía primaria proveniente de los combustibles fósiles en 1997 fue de 8.276 Mtep, cada año tendría que disponerse de entre 0,4 y 6,4 veces más energía fósil para suplir sólo una parte de las funciones del ciclo hidrológico.

Suponiendo que la reposición del recurso se hiciera utilizando las reservas de alguno de los combustibles fósiles, se tendría que, en caso el carbón, cuyas reservas probadas se estiman en 532.561 Mtep, incluyendo antracitas, carbones bituminosos y lignitos, la relación reservas/producción, que hoy es de 210 años, se reduciría, en el caso del coste de reposición mínimo, a 91 años, y en la situación real se reduciría a 9,5 años, suponiendo que los consumos de energía se mantuvieran en los niveles del año 1997; en el caso de considerar sólo el petróleo, cuyas reservas probadas se calculan en 150.692 Mtep, la relación reservas/producción pasaría, en la mejor condición (coste mínimo), de 43,2 a 21,2 años, y en la condición real la disponibilidad de reservas se reduciría a tan sólo 2,6 años. Para el gas natural, con reservas probadas de 131.558 Mtep, la relación reservas/producción se reduciría, en el caso del estimativo mínimo, desde 57 años a 21,4, y en la condición de requerimientos reales la disponibilidad de reservas sólo sería de 2,3 años.

Para ratificar estos resultados se han evaluado los costes de reposición de los recursos de agua por país. De acuerdo con los resultados obtenidos para países como Brasil, Rusia y Canadá, los cuales cuentan con más del 32% de los recursos hídricos renovables del planeta, las reservas de petróleo de cada uno de ellos sólo serían suficientes para reponer sus recursos de agua durante 2, 29 y 3,3 años respectivamente, en el caso de considerar sólo el coste mínimo. Cuando se consideran los valores reales, éstos períodos se reducen a 0,14, 1,8 y 0,24 años respectivamente; esto pone de relieve la imposibilidad física en la cual se encuentra el hombre para sustituir tan sólo una de las funciones de los ecosistemas, aún usando para ello la mejor tecnología que tiene disponible.

Con respecto a los *combustibles fósiles*, se ha realizado una revisión sistemática de las tecnologías para el abatimiento de las emisiones causadas por el uso de éstos y se han determinado los costes energéticos de abatimiento para los principales contaminantes, como son el CO_2 , los NO_x , los SO_x y material particulado. De acuerdo con los resultados obtenidos, para abatir las emisiones de cada uno de éstos se requieren 1.450 MJ/ton, 7.750 MJ/ton, 5.710 MJ/ton y 260 MJ/ton respectivamente.

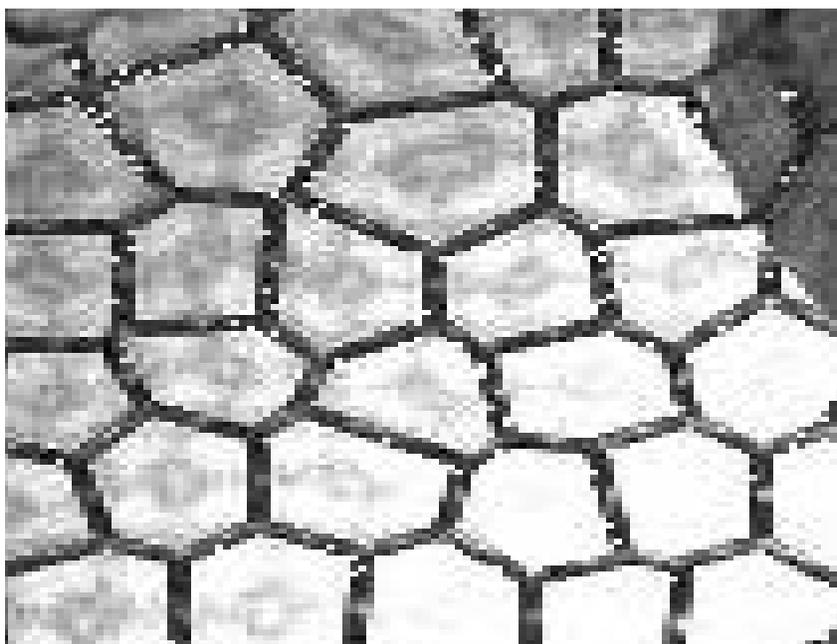
De acuerdo con el modelo propuesto para calcular el capital natural limpio es necesario conocer las emisiones asociadas a las reservas de combustibles clasificadas por rango y por tipo. Usando los factores de emisión publicados y actualizados periódicamente por la EPA se realizó un inventario potencial de emisiones según el cual las emisiones de CO_2 , SO_x , NO_x y material particulado asociadas a las reservas de combustibles fósiles serían de 2.790.453 Mt, 30.102 Mt, 8.342 Mt y 34.438 Mt respectivamente. De acuerdo con esto, el potencial de emisiones de CO_2 es 2,1 veces superior a las emisiones causadas en los últimos 155 años, las de SO_x serían 642 veces superiores a las causadas en 1995 (46,86 Mt), las de NO_x superarían en 200 veces las emisiones causadas en el mismo año y las de material particulado serían 4.300 veces superiores, en el caso de no utilizarse ningún dispositivo de control.

Evitar estas emisiones, utilizando para ello la mejor tecnología disponible, tendría un coste físico de 92.169 Mtep, significando que de la reserva energética probada del planeta, que se estima en 814.811 Mtep, se requeriría disponer del 11,3% para tal efecto. Teniendo en cuenta el consumo de energía fósil de 1997 (8.276 Mtep), los costes de abatimiento globales equivaldrían a 11 años de consumo energético, suponiendo que los niveles se mantuvieran en los de dicho año.

Los costes exergéticos de abatimiento de las emisiones causadas por el uso de la reserva mundial de petróleo representan el 14,4% de los costes exergéticos de abatimiento globales, para el carbón los CE_{xA} globales son equivalentes a 74.311 Mtep, representando el 80,6% de los costes exergéticos de abatimiento globales y el restante 5% (4.608 Mtep) corresponde a los CE_{xA} asociados a las reservas de gas natural.

Otro aspecto importante es que, del coste exergético global de abatimiento (92.169 Mtep), el 94,2% correspondería al abatimiento de las emisiones de CO_2 , y dado que éstas son independientes del tipo de tecnología que se use para transformar la energía química contenida en el combustible, dicho coste sólo sería disminuido si la tecnología de abatimiento mejorara de manera importante para bajar los CE_{xA} unitarios. Las demás emisiones pueden disminuirse a través de mejorar las tecnologías para la transformación primaria del combustible, pero éstas sólo representan un 6,8% de los CE_{xA} globales, por lo tanto poco se lograría en el campo de la disponibilidad energética en el futuro aún si se logaran avances tecnológicos importantes en las tecnologías de abatimiento.

Analizando separadamente cada combustible, las reservas actuales de petróleo se reducirían en un 8,8%, es decir, de la cantidad de reservas que se asumen actualmente como disponibles (150.692 Mtep), el 91,2% son reservas de exergía limpia equivalentes a 137.442 Mtep. En el caso del carbón, la reserva actual se reduce en un mayor porcentaje; teniendo en cuenta la calidad de este combustible, de las reservas energéticas actuales en antracitas y carbón bituminoso (333.495 Mtep) habría que utilizar un 13,2% para disminuir el



impacto ambiental que tendría su uso y el CNL representaría 288.756 Mtep, es decir un 86,8% de lo que actualmente se considera como disponible. Para los carbones sub-bituminosos y lignitos, la reducción de reservas actuales a reservas limpias es aún mayor, debido a las características físicas de estos combustibles el CNL es un 82,7% del capital natural actual, dado que se requieren 29.392 Mtep para llevar a cabo el abatimiento de las emisiones potenciales que causaría su uso.

Respecto al gas natural, por ser un combustible cuyo uso genera poco impacto ambiental, las reservas actuales se ven disminuidas en tan solo un 3,6% cuando se incluyen los CE_{xA} , de tal forma que el CNL representado en el gas natural es de 126.950 Mtep.

En resumen, el capital natural limpio representado en los combustibles fósiles es de 722.642 Mtep, frente a las 814.811 Mtep que se asumen actualmente como disponibles. De esta reserva limpia, el petróleo representa un 19%, las antracitas y el carbón bituminoso el 39,9%, el carbón sub-bituminoso y los lignitos el 23,5% y el gas natural el restante 17,6%. Las relaciones entre reservas y consumo, con respecto a los consumos existentes en 1997, se modificarían de tal forma que para el petróleo éstas pasan a ser 39,4 años, para el carbón serían de 180,9 años y para el

gas serían de 56,2 años, con lo cual se tendrían 3,8 años menos de suministro de petróleo disponible, 29,1 años menos de suministro de carbón y 0,8 años menos de suministro de gas.

LIMITACIONES METODOLÓGICAS Y FUENTES DE ERROR

Existen algunas limitaciones metodológicas que pueden afectar a los resultados obtenidos para cada uno de los recursos analizados. Para el caso de los minerales éstas tienen que ver principalmente con el hecho de asumir que todas las reservas de minerales se encuentran en la forma del mineral principal que lo contiene, así como que la totalidad de la producción también se obtiene de este mismo. La restricción existente en este caso tiene que ver con la forma en que las fuentes estadísticas presentan la información dado que sólo indican, tanto para las reservas como para la producción, las cantidades de elemento contenido y no diferencian entre un tipo de mineral y otro.

También puede entenderse como otra limitación metodológica el hecho de considerar el mismo coste de obtención de los procesos reales para los procesos físicos y químicos ideales. No siempre son aplicables los mismos procesos de obtención para diferentes concentraciones y compo-

siones químicas, con lo cual puede no estarse considerando el proceso más adecuado para las condiciones hipotéticas de obtención. No obstante, el suponer el mismo coste de obtención permite incluir el factor tecnológico en la obtención del mineral y convertir los cálculos de energías mínimas en costes reales.

En lo relacionado con posibles variaciones apreciables en el resultado final causadas por el cálculo de los requerimientos energéticos reales de algunos minerales, lo primero que se debe poner de manifiesto es que los minerales analizados alcanzaron una producción conjunta de 1.237 Mt, de los cuales el hierro representó el 82,5%; el sodio, el 6,3%; el fósforo, el 5,6%; el aluminio, el 1,8%; el potasio, el 2%; el cobre, un 1% y el cromo un 1%, es decir, éstos siete minerales prácticamente cubren el total de los recursos analizados. Por otra parte, para la mayoría de ellos, a excepción del fósforo, se determinaron los requerimientos de energía reales de sus procesos mineros y metalúrgicos de obtención a partir de información publicada por fuentes especializadas.

En cuanto a la valoración física de los recursos renovables de agua, puede considerarse como una limitación metodológica el interpretar el segundo componente del coste exergético de reposición de manera ideal. Por otro lado, considerar el potencial técnico hidroeléctrico del planeta implica que se están despreciando limitaciones ambientales y económicas que pueden hacer imposible de explotar en su totalidad dicho potencial.

En el caso de los combustibles fósiles y el cálculo del inventario potencial de emisiones asociadas a las reservas, se han utilizado factores de emisión para fuentes fijas únicamente sin considerar las emisiones, principalmente de CO₂, que se generarían por el uso de petróleo y gas natural en el sector transporte. La valoración física de la externalidad ambiental lograda aquí es válida desde un punto de vista global y las simplificaciones realizadas para llevarla a cabo tienen relación directa con esta perspectiva, si se aplicara el modelo en escenarios mucho más desagregados, sería necesario contar con datos específicos sobre factores de emisión para el combustible en particular y la tec-



nología específica donde se aprovecha su potencial químico.

Adicionalmente, el modelo propuesto para la valoración del capital natural limpio no tiene en cuenta otros costes energéticos asociados a los procesos de obtención y transporte del combustible; como el coste físico de otros recursos implicados en su transformación, así por ejemplo, en una planta térmica convencional que consuma carbón pulverizado, se evaporan entre tres y cuatro litros de agua por cada kWh producido. Todos estos costes se podrán incorporar en el modelo a medida que se reduzca el nivel de agregación máximo elegido para realizar la valoración.

UNA APROXIMACIÓN AL VALOR ECONÓMICO

Una vez realizada la valoración termodinámica, la cual tiene unidades energéticas, es posible realizar una primera valoración económica de los recursos tomando como referencia los precios del petróleo en el mercado internacional. Actualmente los precios del crudo se mantienen en el rango entre 25 y 30 dólares por barril, con lo cual, tomando el valor medio del rango, el valor económico de las reservas de los minerales analizados sería de 6,6 billones (10¹²) de dólares y el valor del consumo

que se hace cada año de dichos minerales sería de 100.992 millones de dólares.

Siguiendo el mismo criterio, el valor económico que tendrían los recursos renovables de agua, definido por su coste de reposición, variaría entre un valor mínimo de 0,68 billones de dólares y un valor real de 8,6 billones de dólares. En el caso de los combustibles fósiles, también es posible realizar una valoración económica del coste de reposición de esta parte del capital natural, teniendo en cuenta que el coste de fijar una tonelada de CO₂ mediante plantaciones energéticas de alto rendimiento, en un país en desarrollo y con los menores costes de la tierra, es de 4,4 US\$/ton (16,1 US\$/ton C), y adicionalmente, considerando un contenido de carbono medio en los combustibles de un 80%, el coste económico que supondría reponer las reservas de energía fósil actuales varía entre 3.318 y 55.352 billones de dólares, lo cual indica que en el mejor de los casos se necesitaría disponer del PNB mundial actual durante 100 años aproximadamente. Esto, usando la mejor opción natural disponible y con los menores costes económicos existentes.

Lo anterior muestra la imposibilidad de asumir tanto el coste físico como el económico de la reposición de las reservas de combustibles fósiles. Por ello se opta por valorar el coste que supondría hacer un uso limpio de los mismos teniendo en cuenta el coste físico de evitar la externalidad; si se traduce dicho coste en términos económicos, considerando cuenta los precios actuales del petróleo, éste sería de 17,7 billones de dólares, sin tener en cuenta las inversiones de capital necesarias para implantar las tecnologías para abatir las emisiones.

Aunque el procedimiento seguido para lograr esta valoración económica no tiene ninguna relación metodológica con la realizada por otras referencias, es interesante observar cómo los valores económicos obtenidos tienen los mismos órdenes de magnitud. En el caso de los recursos de agua, por ejemplo, Constanza *et al.* indican un valor de 2,8 billones de dólares para las funciones de regulación de flujos hidrológicos, y para el almacenamiento y retención de agua, el valor medio encontrado con la metodología de valoración

nuestras preocupaciones y responsabilidades es estrecho y nuestro egoísmo grande. Y en esto, aunque los resultados de los científicos ayuden a tomar conciencia, molestan, porque nos sacan del paraíso de niñez en la que estamos sumidos los consumidores.

Nuestra economía es tal que no nos sale a cuenta cuidarnos de las cosas; la mano de obra es cara, el tiempo es caro, el dinero es caro, pero los materiales —las cosas de la creación— son tan baratos que no compensa cuidarlas. Este es el punto clave, la permanencia del hombre en la Tierra está ligada a la permanencia de las cosas. El diseño robusto, la calidad, la larga duración y la reparabilidad de los bienes de consumo serán los criterios que poco a poco tendrán que ir penetrando en el diseño industrial.

Durante este siglo XXI veremos cómo la compra de bienes de consumo será sustituida por la compra del servicio que prestan. Aparecerán nuevas empresas que equilibrarán electrodomésticos, ordenadores, muebles, envases, medios de transporte, calefacción, aire acondicionado, etc., que se harán cargo «desde la cuna hasta la tumba» de los equipos. Si toda la naturaleza funciona por ciclos materiales, el ser humano debe aprender a cerrar sus ciclos materiales.

Es necesario que unos principios filosóficos, éticos y sociales dirijan el desarrollo tecnológico. No vale todo. Nuestra sociedad tiene la suficiente inventiva como para acomodarse a una nueva coyuntura que aceptara que los bienes naturales perecederos no pueden ser casi gratis. Ello redundaría en una desmaterialización muy beneficiosa tanto global, al permitir que más personas de toda la Tierra pudieran compartir la tecnología del primer mundo, como histórica, dejando a las generaciones futuras el agua, la energía y los materiales que necesitarán para su desarrollo.

• • • • •

NOTAS

(1) Este coste no incluye los requerimientos energéticos para la compresión y disposición del CO₂ una vez capturado.

BIBLIOGRAFÍA

- AHRENDTS, J. (1980): «Reference States», *Energy* 5, vol. 8, pp. 667-677.
- ALVARADO, S. y IRIBARNE, J. (1990): «Minimum Energy Requirements in Industrial Processes: An Application of Exergy Analysis», *Energy*, vol. 15, nº 11, pp. 1023-1028.
- AUSTIN, D., GOLDEMBERG, J. y PARKER, G. (1998): *Contributions to Climate Change: Are Conventional Metrics Misleading the Debate?*, Climate Notes, World Resources Institute, Washington, D.C.
- AYRES, R. y AYRES, L. (1996): *Industrial Ecology. Towards closing the material cycle*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham U.K. y Northampton.
- BATELLE-COLUMBUS LABORATORIES (1975): *Energy use patterns in metallurgical and non-metallurgical mineral processing*, U.S. Department of Commerce, Washington.
- BOUSTEAD, I. y HANCOCK, G. F. (1981): «Energy and raw materials requirements for tinplate production in the U.K.», *Resources and Conservation*, 6, pp. 29.
- BRAVARD, J. C., FLORA, H. B. y PORTAL, C. (1972): *Energy expenditures associated with the production and recycle of metals*, Report ORNL-NSF EP 24, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.
- BRAY, J. L. (1962): *Metalurgia Extractiva de los Metales no Ferreos*, Ediciones Interciencia, Madrid.
- BROWN, L., RENNER, M., FALVIN, C. y STARKE, L. (eds.) (2000): *Signos Vitales 2000, las Tendencias que Guiarán al Mundo, Informe del World Watch Institute*, GAIA Proyecto 2050, Bakeaz, Bilbao.
- CHAPMAN, P. F. (1973): *The energy cost of producing copper and aluminium from primary sources*, Open University, Research Report ERG 001, U.K.
- CHAPMAN, P. F. y ROBERTS, F. (1983): *Metals and Energy*, Butterworth & Co. Ltd, Londres.
- CLOUD, P. (1977): «Mineral Resources and National Destiny», *The Ecologist: Journal of PostIndustrial Age*, 7, 7, agosto-septiembre.
- CONSTANZA, R., CUMBERLAND, J., DALY, H., GOODLAND, R. y NORGAARD, R. (1997): *An introduction to Ecological Economics*, CRC Press LLC, Nueva York.
- CONSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., SHAHID, N., O'NEILL, R., PARUELO, J., RASKIN, R., SUTTON, P. y VAN DER BELT, M. (1987): «The value of the World's ecosystem services and natural capital», *Nature*, vol. 387, mayo, pp. 253-260.
- CONSTANZA, R. y NEIL, C. (1981): «Energy and Ecological Modelling», en Mitsch, W. J., Bosserman, R. W., Klopatek, J. M. (eds.): *Elsevier*, Nueva York, pp. 745-755.
- DEPARTMENT OF ENERGY, U.K. (1983): *The Iron and Steel Industry*, Energy Audit Series 16, Department of Industry y Department of Energy, Londres.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (1999): *International Energy Outlook 1999*, Office of Energy Markets and End Use, U.S. Department of Energy, Washington.
- FABER, M. (1984): «A biophysical approach to the economy entropy, environment and resources», en Van Gool, W. y Bruggink, J. (eds.): *Energy and Time in the Economic and Physical Science*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, pp. 315-337.
- HAMPEL, C. A. (1959): *Rare Metals Handbook*, Reinhold Publishing Corporation, Nueva York.
- HANCOCK, G. F. (1984): «Energy Requirements for Manufacture of some non-ferrous metals», *Metals Technology*, vol. 11, pp. 290-299.
- IEA GREENHOUSE R&D PROGRAMME (1994): *Carbon Dioxide Disposal from Power Stations*, Cheltenham, U.K.
- INTERNATIONAL WATER POWER & DAM CONSTRUCTION (1996): *International Water Power and Dam Construction Handbook*, Reed Business Pub. Ltd., Sutton, Surrey, Inglaterra.
- KELLOGG, H. H. (1977): «Sizing up the energy requirements for producing primary metals», *Engineering and Mining Journal*, abril.
- KIHLSTEDT, P. G. (1975): «Energy and Mineral Exploitation Techniques», *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 4, pp. 145-149.
- LIDDELL, D. M. (1945): *Handbook of Nonferrous Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company Inc., Nueva York.
- LUTTING, W. G. y ARNDT, P. (1987): *Mineral Resources Extraction, Environment Protection, and Land Use Planning in the Industrial and Developing Countries*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- MORRAL, F. R., JIMENO, E. y MOLERA, P. (1985): *Metalurgia General*, Tomo I, Editorial Reverte, S.A., Barcelona.
- NAREDO, J. M. y GASCÓ, J. M. (1997): «Spanish Water Accounts», en San Juan, C. y Montalbo, A. (eds): *Environmental Economics in the European Union*, Mundi-Prensa y Universidad Carlos III de Madrid.
- PAGE, N. J. y CREASEY, S. C. (1975): «Ore Grade, Metal Production and Energy», *Journal Research U.S. Geological Survey*, vol. 3, nº. 1, enero-febrero, pp. 9-13.
- RANZ, L. (1999): *Análisis de los costes exergéticos de la riqueza mineral terrestre. Su aplicación para la gestión de la sostenibilidad*, tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, España.
- SMIL, V. (1991): *General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*, John Wiley and Sons, Nueva York.

SHIKLOMANOV, I. (1999): *World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for 21-st Century*, Federal Service of Russia for Hydrometeorology & Environment Monitoring State, Hydrological Institute, San Petesburgo.

SZARGUT, J. (1989). «Chemical Exergies of The Elements», *Applied Energy*, 32, pp. 269-286.

SZARGUT, J., MORRIS, D. y STEWARD, F. (1988): *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Hemisphere Publishing, Nueva York.

TAYLOR, S. R. y McLennan, S. M. (1995): «The Geochemical Evolution of the Continental Crust», *Reviews of Geophysics*, 33, 2, mayo, pp. 241-265.

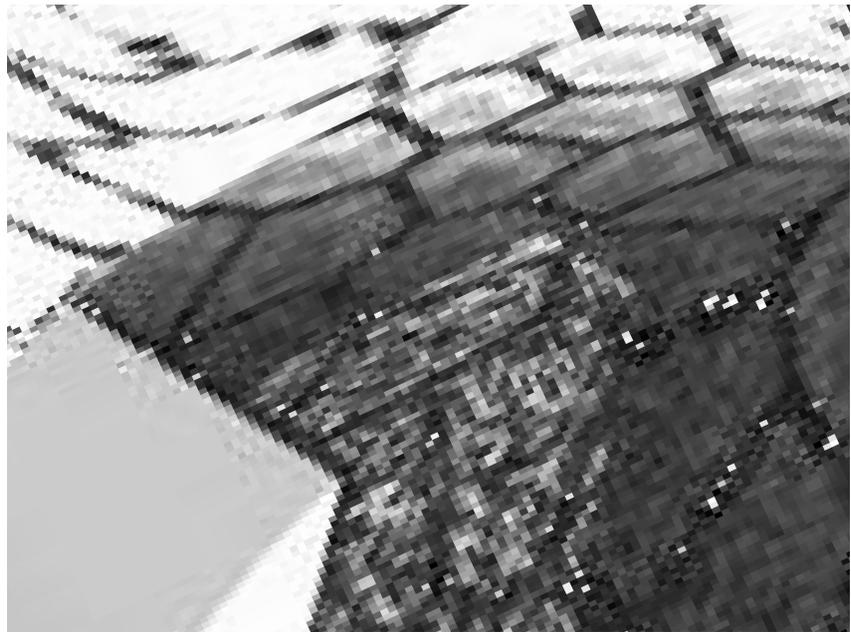
U. S. BUREAU OF MINES (1980): *Principles of a Reserve/Resource classification for minerals*, U.S. Geological Survey, Reston.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (1999): *Energy Outlook 1999*, Department of Energy, Washington.

U.S. BUREAU OF MINES (1999): *Mineral Year Book 1998*, U. S. Geological Survey, Washington.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1998): *EP-42 Emission Factors*, The Emission Factor and Inventory Group, U.S. Environmental Protection Agency.

VALERO A. y RANZ, L. (1999): «El coste exergético de reposición de los recursos minerales», en Naredo, J. M. y Valero, A. (dirs.): *Desarrollo económico y Deterioro Ecológico*, Fundación Argentaria y Visor, Madrid, pp. 241-252.



VALERO (1999): «Sobre la producción de combustibles a partir de la radiación solar», en Valero, A. y Naredo, J. M. (dirs.), *Desarrollo económico y deterioro ecológico*, Fundación Argentaria y Visor, Madrid, pp. 277-284.

WACKERNAGEL, M. *et al.* (2000): *Tracking the ecological overshoot of the human economy*, Edited by Edward O. Wilson, Harvard University, Cambridge, MA.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (1999): *World Resources 1998-1999: a Guide to the Global Environment*, Oxford University, Nueva York.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (2000): *Recursos Mundiales 2000. Guía Global de Medio Ambiente*, Editorial Ecoespaña, Madrid.

WORLD WATER COUNCIL (2000): *World Water Vision, Making Water Everybody Business*, Earthscan Publications Ltd., Londres.

YOSHIKI-GRAVELSINS, K. S., TOGURI, J. M. y CHOO, T. C. (1993): *Metals Production, Energy, and the Environment*, Part I: *Energy Consumption*, JOM, mayo.

ZALETA, A., RANZ, L. y Valero, A. (1998): «Towards a unified measure of renewable resources availability: The exergy method applied to the water of a river», *Energy Convers. Mgmt.*, vol. 39, nº 16-18, pp. 1911-1917.