

# ¿Valor físico o precio monetario? De la crematística a la oikonomía: el caso de los recursos minerales del planeta.

Mariano Vázquez Espi\*

Belo-Horizonte, 3–10–2012  
v20130108, 8 de enero de 2013

## Resumen

Rudolf Clausius, uno de los padres de la termodinámica del siglo XIX (junto a James Clerk Maxwell o Ludwig Boltzmann, por citar alguno más), publicó en 1885 un programa de gestión de los recursos energéticos de la Naturaleza desde la perspectiva del bienestar de la humanidad. Su programa estaba basado en las leyes fundamentales de la física aplicadas al planeta Tierra y quedaba enfrentado a otros programas de su tiempo, basados en todo tipo de convenciones monetarias e ideologías políticas. Sin embargo, fueron estos programas los que vencieron en el combate de la aplicación práctica, conduciendo a la humanidad a su situación presente de crisis ecológica.

La termodinámica siguió progresando, y la del siglo XX fue capaz de completar y extender las ideas de Clausius, alumbrando una nueva magnitud, la exergía o energía útil, capaz de dar cuenta del coste de reposición de los recursos no renovables, específicamente de los minerales que, con leyes de pureza muy dispares, encontramos a nuestra disposición en los yacimientos.

Es por tanto posible plantear un programa semejante al de Clausius referido a los yacimientos minerales. Que su aplicación sea efectiva dependerá de la voluntad política de quien ostente el poder de gestionar el uso del territorio en cada lugar.

---

\*Grupo de Investigación en Arquitectura, Urbanismo y Sostenibilidad de la Universidad Politécnica de Madrid (<http://habitat.aq.upm.es/gi/>)

### Abstract

Rudolf Clausius, who was one of the fathers of the thermodynamics of the XIX century (James Clerk Maxwell or Ludwig Boltzmann were some of the others), published during 1885 a management project of Nature energy resources from the point of view of the human well-being. His project was based upon the fundamental laws of physics as applied to the planet Earth, confronting other projects of his time, which were based upon all kind of monetary conventions and politics ideologies. However, were the latter projects that won the fight of the practice application, driving the mankind to the present situation of ecological crisis.

Thermodynamics continued its progress, and during the XX century was able to complete and to extend the Clausius's ideas, springing a new measure, the exergy or useful energy, with which it is possible to account the replacement cost of the no-renewable resources, specifically of the minerals that, with very different ore grades, we found at our disposal in the deposits.

Hence, nowadays we can propose a similar project that that of Clausius, but about the mineral deposits. That it is adopted in practice will depend of the political will of those who have the power of managing the use of the territory in each place of the world.

“Facts do not cease to exist because they are ignored”

Aldous Huxley

## 1. Las dos economías

Para Vitruvio la *oikonomía* (del griego *οικονομία*, uno de los cuatro elementos que para él componen la arquitectura, junto al orden, la proporción y la disposición) consiste “en el debido y mejor uso posible de los materiales y de los terrenos, y en procurar el menor coste de la obra conseguido de un modo racional y ponderado”. La economía material, física, queda incluida, por tanto, como uno de los principios rectores de la arquitectura vitruviana, con intensidad pareja a otros tenidos hoy por más arquitectónicos, como la proporción o la simetría. En su época, junto a la *oikonomía* se prestaba atención también a la *crematística* (*χρηματιστική*) que gira en esencia en torno al interés pecuniario de un negocio, es decir, a la renta simplemente monetaria [para los detalles, véase Vázquez Espí, 2000].

Desde los tiempos clásicos hay, por tanto, dos visiones en torno a las nociones de coste y beneficio. La crematística tenía en principio las de ganar frente a la ecología (que es el término por el cual podemos mejor traducir hoy el concepto de la *oikonomía* vitruviana) por una simple y aritmética razón: en tiempos del Imperio Romano era mucho más fácil contar sestercios que computar el “mejor uso de materiales y terrenos”: mientras que en el primer caso no hay ni siquiera dudas sobre cuál es la unidad de cuenta, en el segundo la incertidumbre se instala desde el principio, pues ¿cómo comparar o sumar, digamos, un metro cúbico de madera con un quintal de piedra?

Sin embargo, las dos visiones resistieron con mejor o peor fortuna el paso del tiempo. La tensión lógica entre ambas visiones la encontramos en el *Oráculo manual y arte de prudencia* de Baltasar Gracián: “Más vale ser engañado en el

precio que en la mercadería” o “Más vale el buen ocio que el negocio. No tenemos cosa nuestra sino el tiempo”. Ya en el siglo XX el poeta Antonio Machado lo expresó en forma muy sucinta: “Todo necio confunde valor y precio”. Por supuesto, la visión crematística siempre contó con el beneplácito del poder político y en buena medida desde esa visión se condujo la marcha de la civilización occidental hasta nuestros días.

En el siglo XIX, nació la termodinámica, esa economía de la Naturaleza que iba a colmar en no pequeña medida la incertidumbre asociada a la medida del coste desde una perspectiva ecológica. Como es bien conocido, hacia 1850 se ponen en claro dos principios de conservación, los de la masa y la energía, y un principio de cualificación, la Segunda Ley de la Termodinámica, que vino a expresar en el lenguaje de la ciencia europea algo bien conocido en muchas culturas vernáculas: un tronco de madera sólo puede quemarse una vez. Es decir, la masa y la energía contenidas en el tronco se conservan pero en otra forma (gases, cenizas y calor disipado) que ya no nos resultará de la misma utilidad que el tronco que fue. Tales transformaciones son irreversibles y, en teoría, sólo con realización de trabajo (es decir, con nuevas transformaciones energéticas) puede revertirse el proceso para obtener de gases y cenizas de nuevo *otro* tronco (¡la fotosíntesis con trabajo solar!). Retornar al mismo tronco es, incluso en teoría, poco probable, dado que haría falta transformar cantidades prácticamente infinitas de energía para localizar cada uno de sus átomos originales en la sopa atómica del planeta. La teoría, al decir del mismísimo Einstein, resultó ser una de las más sólidas de la física moderna, habiendo permanecido estable su esqueleto conceptual hasta nuestros días.

Rudolf Clausius fue una de los padres de la termodinámica. Es bien conocido su resumen de la disciplina: *El calor nunca puede fluir espontáneamente de un cuerpo frío a otro caliente*. En su artículo “Über die bewegende Kraft der Wärme” (“Sobre la fuerza motriz del calor”) de 1850, ofreció la primera formulación consistente de las dos primeras leyes de la termodinámica e introdujo el neologismo *entropía* del griego “τροπή” (transformación). Tres años antes de su muerte, Clausius [1885], aplicó estas leyes a la industria en el contexto de nuestro planeta, llegando a la conclusión de que sólo una industria basada en energía solar estaría exenta de producir en el futuro una crisis de escasez de combustibles minerales.

Su razonamiento es instructivo por su simplicidad. La Tierra es un sistema aislado en lo que se refiere al intercambio de materia, por tanto la masa se conserva. Por el contrario es un sistema abierto e intercambia energía con el espacio, de manera que ésta puede aumentar o disminuir en cierta medida. Clausius contempla la máquina de vapor alimentada por carbón, o los motores eléctricos alimentados por baterías de cinc o alternativamente por máquinas de vapor (turbinas), y ve que ambos procesos a la larga toparán con los límites ciertos de las reservas de carbón o cinc, puesto que la cantidad consumida cada año de tales materiales supera con mucho la cantidad producida por la Naturaleza en el mismo tiempo. No valdría, para sortear tales límites, intentar producir carbón o cinc, pues en tal empeño consumiríamos como muy poco la misma cantidad de energía que luego extraeríamos de ellos. Salvo que empleáramos energía externa a la Tierra, la del Sol o la de las mareas. Pero si así hiciéramos, no tendría sentido emplear tal energía externa en producir carbón o cinc, pues directamente podríamos obtener calor o electricidad. . .

Conviene subrayar la capacidad de anticipación de Clausius. En su texto de 1885 describe, por ejemplo, como un salto de agua (que es energía solar acumulada en el ciclo hidrológico) podrá ser empleado para producir electricidad, y cómo ésta podrá ser distribuida a ciertas distancias sin grandes pérdidas, y cómo de esta manera los más diversos artefactos (nuestros electrodomésticos de hoy) podrán ser empleados en la industria o en la vivienda, sin necesitar de una máquina de vapor en el mismo lugar (como era habitual en la industria de su época).

Sin embargo, la termodinámica del siglo XIX no consiguió imponerse a la economía monetaria. Por el contrario fue ésta última, en su formulación neoclásica [Vázquez Espí, 2000], la que acabó por imponerse en la forma hoy bien conocida de “la economía de mercado”: según esto, es el mercadeo entre las personas humanas el que fija el precio debido de las cosas, permitiendo valorarlas y por tanto emplear los recursos disponibles de la mejor manera para acrecentar la riqueza. Cabe destacar que la economía monetaria se desentiende de todas las leyes de conservación de la física, a la que da olímpicamente la espalda. La clave aquí es la producción y el crecimiento ilimitado. De esta manera, la crematística moderna suma a la necedad tan bien descrita por Machado, otra nueva, la de creer que en un espacio finito como el de la Tierra es posible un crecimiento ilimitado de alguna magnitud mensurable.

El fracaso del pensamiento científico frente a los intereses de la burguesía dominante, bien salvaguardados por la economía neoclásica, nos han llevado a la actual crisis ecológica [cf. Naredo and Valero, 1999]. Para salir de ella seguimos en las mismas, repitiendo la propuesta de Clausius, quizá sin percatarnos de que el problema es otro, el de conseguir tener el poder necesario para llevar esa propuesta adelante. Este punto es clave: no hay posibilidad lógica de arreglo o acuerdo entre ambas visiones económicas, algo repetido una y otra vez, con mayor o menor vigor, desde Vitruvio.

## 2. Costes y beneficios

Aunque termodinámica, entropía, etc, son palabras que pueden asustar al profano, en realidad el trasunto físico no es excesivamente complicado y puede describirse utilizando como analogía general un caso particular, el del agua.

Sea un mundo de niveles, en el que la humanidad está confinada a un nivel concreto (algo no muy distinto, si se piensa con calma, de nuestra situación real), véase la FIGURA 1. Con el agua disponible en su nivel la gente puede, por ejemplo, beber. La conservación de la masa de la gente obliga a orinar, y si la gente quiere conservar su nivel bien aseado, el agua residual debe ser evacuada a otro. La gravedad ayuda: basta dejarla caer a los niveles inferiores. La energía solar, y el ciclo permanente de evaporación/precipitación que ocasiona en la biosfera, presta un servicio formidable: no sólo depura el agua residual, también la eleva por encima del nivel humano de modo que, previa recolección de la precipitación, vuelve a estar disponible. Sólo hay un pequeño problema: la cantidad de agua total, en el conjunto de los niveles, es constante y la cantidad de agua acarreada y purificada en cada ciclo solar también lo es, de peso  $S$ , digamos. A largo plazo no puede hacerse nada que modifique estos límites (al menos en este mundo hipotético en que todo se ha reducido a agua y seres humanos). Todo esto funciona a las mil maravillas mientras la población no requiera más agua

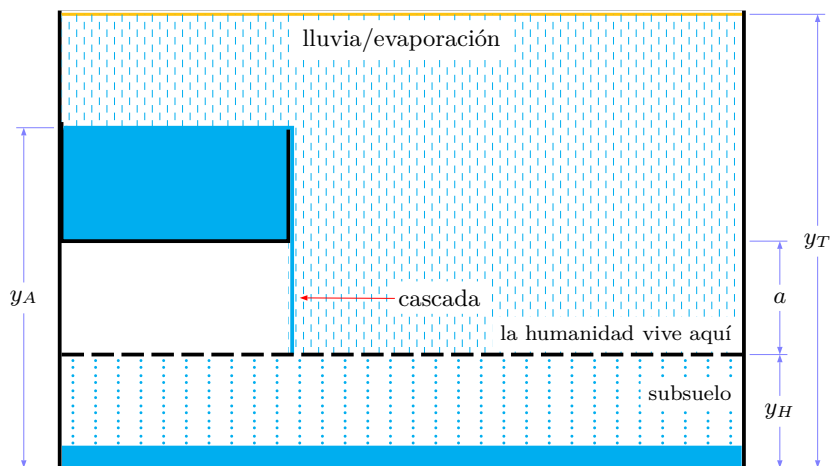


FIGURA 1: UN MUNDO DE AGUA: PRIMEROS TIEMPOS

La humanidad está *confinada* en el nivel  $y_H$  y no puede contemplar la totalidad de su propio mundo (las paredes son opacas). El agua aprovechable es la de lluvia,  $L$ , y la de la cascada,  $C$ , medidas ambas en peso. De ésta última también podría extraerse electricidad, como mucho  $C(y_A - y_H)$ . El Sol no está dibujado, pero está presente indirectamente en el ciclo de evaporación y precipitación del agua. El campo gravitatorio se supone igual al de la Tierra.

que la disponible ( $S$ ), algo que no pasará si la población no supera el límite correspondiente (así funcionaron las civilizaciones humanas hasta fecha relativamente reciente, colapsando aquellas que superaban la población *sostenible* por el territorio).

El agua que cae puede emplearse de otras formas. El agua por encima de un cierto nivel tiene una energía útil gravitatoria, o exergía gravitatoria, respecto a esa referencia, energía que es simplemente su peso por la altura. Por ejemplo, a una altura  $h$ , la exergía de un cierto peso de agua  $P$  es simplemente  $Ph$ . El agua por debajo tiene, en correspondencia, exergía pero negativa (o si se quiere energía inútil, otra vez positiva): es el trabajo que habría que hacer para situarla en el nivel de referencia: se trata, en positivo, de un coste. La exergía del agua por encima de nuestras cabezas la podemos transformar en otro tipo de exergía, por ejemplo eléctrica, que podemos emplear en otros menesteres distintos de apagar nuestra sed. Pero ¡ay! el agua que se recolecta en un nivel no contiene exergía potencial para ese nivel, precisamente por estar a esa altura,  $h = 0$ .

En nuestro mundo hipotético el agua de la cascada tiene una exergía gravitatoria igual a su peso  $C$  por la altura  $y_A - y_H$ , es decir,  $C(y_A - y_H)$ . La cantidad total de agua trasegada en cada ciclo solar,  $S$ , será la suma de  $C$  más la debida a la precipitación en el nivel "humano",  $L$ , es decir,  $S = C + L$ . Nótese bien: la precipitación total es  $S$ , pero una parte,  $C$ , cae en el nivel  $y_A$  y sólo tras la formación de la cascada está disponible en el nivel  $y_H$ . La humanidad dispone por tanto de un máximo de agua para beber,  $S$ , y de otro de electricidad,  $C(y_A - y_H)$ . El flujo de agua  $C$  puede emplearse dos veces: para producir electricidad, y para beberla después.

La electricidad podríamos medirla en unidades de energía ( $Ph$ ) pero igualmente bien en peso equivalente de agua a una cierta altura de referencia. Para

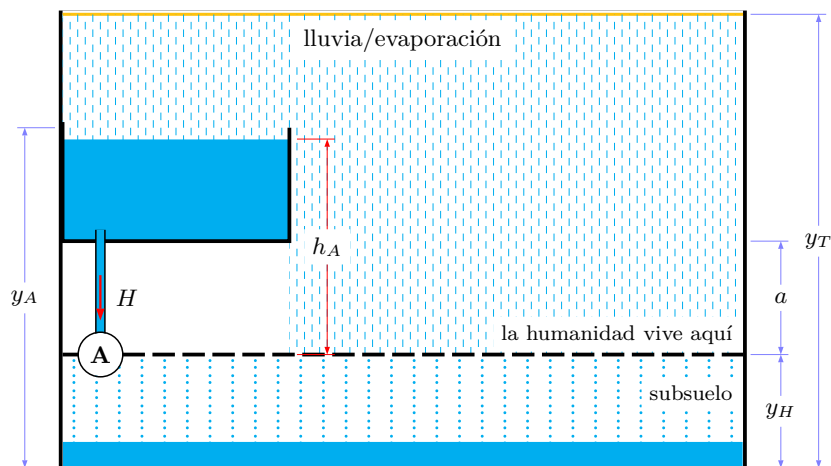


FIGURA 2: UN MUNDO DE AGUA: INICIO DE UNA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. La vieja cascada desapareció al poco de inaugurarse la planta hidroeléctrica **A**. El agua disponible es ahora la de lluvia,  $L$ , más la producida por la central,  $H$ . Se dispone además de electricidad (como mucho  $Hh_A$ ). En torno a la central se organiza una economía monetaria: el agua de lluvia sigue siendo gratis, pero no la de la central ni la electricidad. En la medida en que aumente la demanda de agua o de electricidad, puede aumentarse la cantidad de agua extraída  $H$ .

este menester podemos usar  $a$ , que es la altura del espacio donde están confinados nuestros personajes humanos. De este modo una cantidad de electricidad  $E$  equivale a un peso  $E/a$  de agua a una altura  $a$ . Pero es cuestión de gustos elegir, en vez del peso equivalente de agua, una altura equivalente de un cierto peso, por ejemplo el del agua aportada por la lluvia  $L$ . Es decir, que una cantidad de electricidad  $E$  es equivalente a almacenar todo el agua de lluvia de un ciclo,  $L$ , a la altura  $E/L$ . Del mismo modo, la exergía se mide de forma natural en unidades de energía, pero podría medirse en peso o altura equivalentes, siempre que se defina sin ambigüedad la referencia empleada para calcular la equivalencia.

¿Pueden superarse a corto plazo los límites antedichos? En nuestro hipotético mundo quizás sí puede hacerse algo en ese sentido, si la organización del mundo es propicia para ello. Imaginemos que alguien “descubre” el “yacimiento” de agua dulce (del que proviene la cascada), que contiene una cantidad enormemente superior a la que se viene empleando para beber y obtener electricidad. El yacimiento y la cascada están ligados, pero este hecho puede ser o no evidente: en la morfología del mundo de la figura puede suponerse, pero no comprobarse: confinados en su nivel (sin poder salir de él), nuestros personajes no pueden tener un conocimiento cabal de todas las circunstancias del yacimiento, solo saben que pueden extraer agua a una altura  $a$  perforando el techo que cierra su ámbito. Podrían decidir entonces “extraer” agua a voluntad de ese “yacimiento” para aumentar tanto la cantidad disponible de agua como de electricidad. Es decir, que a la cantidad  $S$  suministrada por cada ciclo solar se le podría añadir una cantidad variable  $H$  obtenida por medios artificiales, véase la FIGURA 2.

Claro que ¿para qué quieren más agua? Una primera respuesta es el “creced y multiplicaros”. Con más agua disponible la población puede aumentar, sin

pasar sed. O bien, con una población constante, podemos hacer más cosas con más electricidad. O una mezcla de ambos extremos. . .

Sea como fuere, de llevarse a cabo este *progreso*, podrían acaecer algunos cambios sociales bastante notables. La cantidad  $S$  es (o era) un bien libre, pues en la medida en que el Sol sale para toda la humanidad, así estará disponible el agua acarreada y purificada por el ciclo hidrológico. Pero suponiendo que el arreglo para aprovechar el “yacimiento” de agua esté concebido por un “inventor”, éste podría reivindicar un pago por sus desvelos y gastos. Para llevar el invento a término, pongamos que nuestro personaje afronta un gasto  $g$  en cada ciclo (por ejemplo pagando a gente que le ayude en el manejo de los artefactos). A la vista de la demanda de agua adicional ajustará sus ingresos a una cierta cantidad  $i$ , de manera que la diferencia  $i - g$  será su beneficio. El precio del agua resultará entonces  $p = i/V$  siendo la  $V$  el peso de agua vendida en cada ciclo, siempre menor, o a lo sumo igual, que la extraída del yacimiento. La gente que quiere más agua o más electricidad simplemente paga por ello y la cosa puede funcionar.

La evolución de una sociedad semejante puede conducirla a tantas situaciones distintas que son innumerables (en sentido literal), así que no tendría objeto intentar describirlas. Todas ellas tendrán en común, sin embargo, una característica: en cuanto se comience a extraer agua del yacimiento en una cantidad  $H$  mayor que  $C$ , la cascada desaparecerá, pues al bajar el nivel de agua en el yacimiento, el agua de lluvia no rebosará a la altura  $y_A$  como hacía en el mundo primigenio. Nuestro inventor fracasa así en su primera promesa: no habrá agua disponible a razón de  $H + S = H + L + C$ , será algo inferior,  $H + L$ . En los primeros tiempos, y dependiendo de las peculiaridades de cada ciclo solar y de la extracción realizada, la cascada aparecerá y desaparecerá. Pero una vez  $H$  supere  $C$ , y esa intensidad de extracción se mantenga, desaparecerá para siempre. . .

Aunque, como queda dicho, la evolución de este pequeño mundo es impredecible, podemos, simplemente como ejercicio para fijar conceptos, seguir uno de los cursos posibles de los acontecimientos. Con más agua la población crece. Conforme el yacimiento se vacía la cascada primitiva desaparece, pues parte de la precipitación solar, uniformemente repartida por simplicidad, rellena el yacimiento pero no rebosa como hacía antes. Por tanto la cantidad de agua solar disminuye, quedando reducida a la de la lluvia,  $L$ . La electricidad gratuita desaparece junto con la cascada. Los “científicos” podrían percatarse de la relación causal entre la extracción y la desaparición de la cascada, si hay entre ellos aficionados al ciclo hidrológico. Si llega a establecerse la relación causal entre el aprovechamiento del yacimiento descubierto y la desaparición de la cascada, podría haber gente dispuesta a protestar y reclamar sus antiguos derechos sobre la cascada desaparecida y su capacidad de dar agua y producir electricidad.

Si el invento es aceptado mayoritariamente la evolución continuará. Para evitar tener dos grifos (agua gratis y agua pagada) se decide, algunas generaciones después, unificar la distribución de agua y de electricidad de pago, quedando a cargo del sistema unificado los “inventores”, que ahora se llaman “capitalistas”. (Porque adelantan el capital necesario para aumentar la cantidad  $H$  conforme la población crece y ésta, sin limitaciones de agua, comienza a crecer bastante deprisa. ¡Y nadie quiere sufrir sed!)

De vez en cuando, el ciclo solar se altera (por peculiaridades climáticas) y cuando la cantidad  $S$  y por tanto  $L$  disminuyen, la cantidad total disponible  $L +$

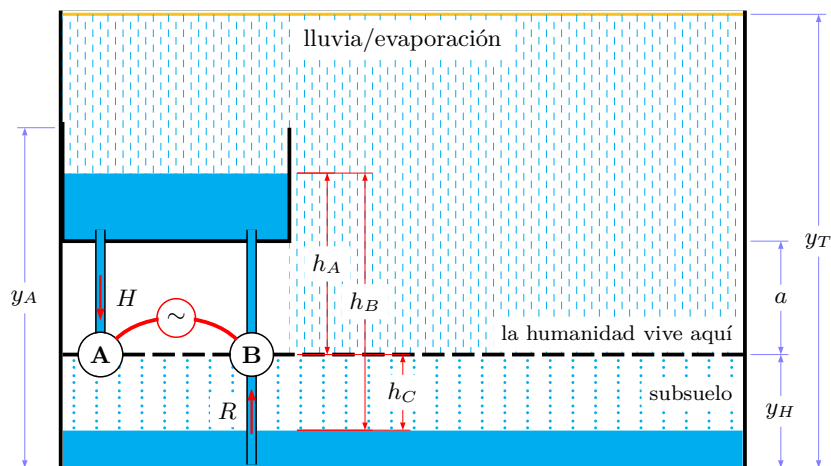


FIGURA 3: UN MUNDO DE AGUA: LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL EN CRISIS  
 Mucho indicios han llevado a la preocupante conclusión de que el yacimiento del que se alimenta la central **A** acabará agotándose. Los mismos indicios llevan a la conclusión de que en el subsuelo tiene que haber un importante yacimiento de agua. Con parte de la electricidad de la vieja central se alimenta una nueva bomba **B** para rellenar el yacimiento superior, a fin de evitar su agotamiento.

$H$  también lo hace: la demanda supera a la oferta, y los precios se disparan. Con las ganancias extras, los capitalistas pueden incrementar  $H$  (es decir, mejorar la infraestructura **A**), para hacer frente a futuras crisis de escasez, pero en general tenderán a irse a las Bahamas, salvo que los poderes públicos les obliguen a reinvertir el sobrevenido beneficio. Pongamos que mal que bien la crisis se supera. La población sigue creciendo.

Generaciones después, con una idea mucho más cabal y afinada del mundo en el que viven, nuestros personajes caen en la cuenta de que el yacimiento tendrá que agotarse más tarde o más temprano, pues han llegado a la irrefutable conclusión de que no puede ser infinito. Una sombría angustia invade a la sociedad ¿qué haremos cuando el yacimiento se agote ahora que nuestro consumo de agua es  $L + H$ , mucho mayor que el primitivo  $L + C$ ? Los “científicos” se ponen manos a la obra y deducen lo siguiente: en cada ciclo solar el yacimiento pierde  $H$ . Como han analizado el ciclo hidrológico del derecho y del revés, saben que asciende por evaporación un peso de agua  $S = C + L$  pero que sólo precipita  $L$ , de manera que como a estas alturas ya saben que el agua ni se crea ni se destruye, la diferencia  $S - L = C$  tiene que acabar en el yacimiento, de manera que actualmente se pierde en cada ciclo una cantidad

$$\mathcal{P} = H - C \quad (1)$$

Pero como no saben cuanta agua contenía el yacimiento ni cuanta ha sido extraída en el pasado (la estadística ¡ay! surgió muchas generaciones después de la inauguración de la central **A**) no pueden siquiera estimar cuantos años faltan para su definitivo agotamiento.

Los “inventores” que siguen trabajando para los capitalistas comienzan a discurrir y acaban por dar una posible solución: ¡recarguemos el yacimiento con el agua que tiene que haber por debajo de nuestro nivel!



En efecto, en cada ciclo solar actual, hacia abajo cae  $L + H$ , y como sólo retorna gracias al Sol  $S = C + L$ , en cada ciclo se acumula abajo una cantidad  $H + L - S = H - C$ , que es justamente la pérdida del yacimiento de arriba. Así que indudablemente abajo tiene que haber un yacimiento de agua lista para ser utilizada salvo por ser agua sucia. Llamémosle Yacimiento Bajo por contraposición al Alto. ¿Cómo alimentaremos el recargador? se preguntan. Con electricidad, por supuesto. La idea se lleva a cabo de la mejor manera, y al final un peso  $R$  de agua sube desde el yacimiento Bajo hasta el yacimiento Alto en cada ciclo solar, y la sociedad vuelve a respirar aliviada, véase la FIGURA 3.

La mala noticia podría llegar desde la física. Dada la morfología de este mundo hipotético, por cada peso  $R$  que asciende por el recargador, habrá que realizar un trabajo como mínimo igual a  $Rh_B$ , es decir, suministrar la diferencia de exergía entre ambos niveles al agua de Abajo, pues, en efecto, la acción de subir agua es equivalente a dotarla de una exergía gravitatoria que no tiene en su nivel de origen. ¿De dónde sale la energía para realizar ese trabajo? Pues de la exergía del agua de Alto. Para evitar complicaciones, podemos suponer que el *stock* de ambos yacimientos es muchísimo mayor que la cantidad  $R$  trasvasada en cada ciclo, de manera que, en cada ciclo, podemos considerar que el nivel de agua en ambos yacimientos es constante, no experimentando variación significativa con el trasvase de  $R$ . Como la turbina de la central **A** está al nivel de la humanidad, como mucho suministrará  $h_A$  unidades de exergía por unidad de peso del agua, por tanto, la recarga demandará un peso  $X$  de agua de Alto que debe cumplir con:

$$Xh_A = Rh_B \quad X = R\frac{h_B}{h_A} = R\alpha \quad \alpha = \frac{h_B}{h_A} > 1 \quad (2)$$

Y esto sólo para subir el agua. Pero hará falta más electricidad de hecho para purificarla, digamos  $p$  unidades por cada unidad de peso de agua, de manera que se requerirá una electricidad adicional  $pR$ , lo que exigirá una extracción adicional de agua  $pR/h_A$ . A la proporción  $p/h_A$  la denominaremos  $\beta$ ; nótese de paso que  $p$  puede interpretarse como una longitud, pues esa es la razón entre la energía (trabajo) y el peso (fuerza), es decir, que la impureza del agua puede medirse “como equivalente” a que el agua dulce, sin contaminar, estuviera a una altura  $p$  por debajo de nuestro nivel, pues en ambos casos necesitamos la misma exergía para obtenerla en forma de agua dulce en nuestro nivel. De una forma u otra, el peso total de agua a extraer para alimentar de energía el recargador será  $R(\alpha + \beta)$  con  $\alpha > 1$ ,  $\beta > 0$  y  $\alpha + \beta > 1$ . En adelante usaremos  $\kappa = \alpha + \beta$ ,  $\kappa > 1$ , que no es sino el peso de agua que hay que extraer del yacimiento por unidad de peso de agua de recarga. Es decir, el coste específico de la recarga de agua medido en relación a la extracción de agua del yacimiento.

¿Qué cantidad  $R$  de agua debemos o podemos reponer en cada ciclo? Depende de los propósitos que se persigan. Si se quiere mantener la producción eléctrica para usos distintos de mover la bomba **B**, tenemos que seguir extrayendo  $H$  más la cantidad adicional para el objetivo de reposición  $R$  del yacimiento Alto que se fije. De suerte que el consumo total de agua podría llegar a ser ahora mayor,  $L + H + \kappa R$ . ¿Que pasará con el yacimiento Alto? Gana agua a razón de  $C + R$  (recarga de lluvia más la recarga artificial) y pierde  $H + \kappa R$ , por tanto en cada ciclo su ganancia es:

$$C + R - H - \kappa R = C - H + (1 - \kappa)R = -\mathcal{P} + (1 - \kappa)R \quad (3)$$

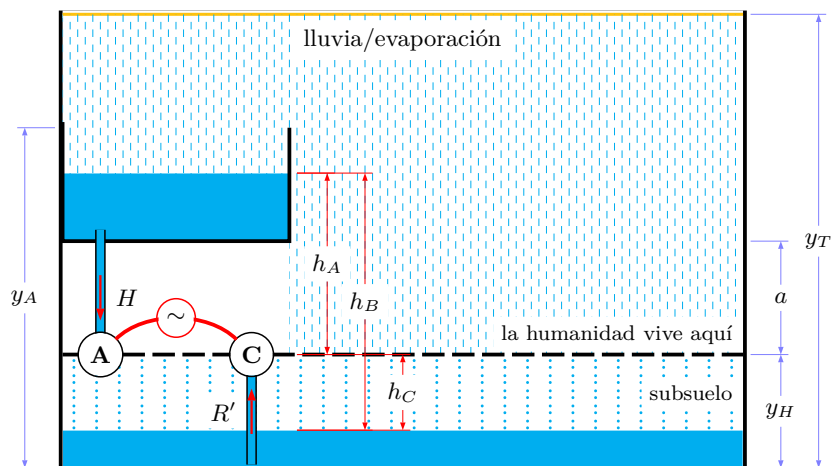


FIGURA 4: UN MUNDO DE AGUA: SOLUCIÓN ALTERNATIVA A LA RECARGA. El recargador **B** puede sustituirse por una bomba **C** que simplemente recicla el agua de Bajo hasta el nivel “humano”. Qué esta alternativa disminuya la tasa de agotamiento de Alto depende de las características del mundo concreto.

y como  $1 - \kappa < 0$  (pues  $\kappa > 1$ ), el agua en el yacimiento Alto disminuye... ¡más deprisa que antes! ¡No sólo no hay ganancia sino que hay más pérdida! Eso sí, cada vez hay más agua en el yacimiento Bajo. La puesta en marcha del recargador sólo acelera el agotamiento del yacimiento Alto, si se pretende mantener el consumo eléctrico al que la sociedad se ha acostumbrado.

¿Se dará cuenta la sociedad de este último hecho? No necesariamente. Dado su confinamiento, nuestros personajes no pueden medir directamente ni  $h_A$  ni  $h_B$ . Pueden hacer suposiciones sobre  $y_H$  y desde luego pueden deducir que  $h_A > a$  y que  $h_B > h_A$ . Si los gestores de ambas máquinas intercambian información física, en seguida se darán cuenta de que la extracción de Alto,  $H + \kappa R$ , es superior a la recarga  $R$ . Si miden energías con la misma precisión con que han analizado el ciclo hidrológico podrían inferir indirectamente todos los valores en cada instante, midiendo el flujo de agua en la central **A** y el flujo eléctrico entre la turbina **A** y la bomba **B**, para un flujo  $R$ . Pero si la sociedad en cuestión valora las cosas por sus precios, podrían no llegar a la conclusión anterior. Simplemente, se ve que sube  $R$  hacia Alto, algo que antes no pasaba, y eso es bueno. Los gestores de Alto han visto aumentar sus ventas y por tanto sus beneficios. Dado el interés social de la recarga, la sociedad financia con fondos públicos la gestión del yacimiento Bajo, de manera que aquí también hay beneficios. Todo parece ir miel sobre hojuelas. Y sin embargo todo va a peor... Si alguien tiene una hipótesis pesimista y pone en duda la jugada se encontrará con dificultades. Dada la incertidumbre sobre algunos de los parámetros clave y los intereses monetarios en juego, las discusiones podrían ser interminables... Si la información de los caudales de extracción de ambos yacimientos es confidencial y no está disponible para el público, la tarea de una oposición crítica será muy difícil...

Lo más que podrían los críticos es proponer la introducción de alguna mejora. ¿Para qué elevar el agua del yacimiento Bajo hasta el yacimiento Alto? ¿No bastaría con elevarla a nuestro nivel? podrían preguntarse los pesimistas. ¿No

bastaría con reciclar directamente, sin recarga? En efecto, si sólo se pretende subir  $R'$  una altura  $h_C$ , los movimientos serían como sigue, véase la FIGURA 4. Para elevar un peso de agua  $R'$  una altura  $h_C$ , se necesitará extraer de Alto una cantidad  $R' \frac{h_C}{h_A} = R' \alpha'$ . Ahora  $\alpha'$  puede ser mayor o menor que la unidad dependiendo de la morfología concreta de este mundo hipotético (en las figuras  $\alpha' < 1$ , pero podría ser mayor que la unidad si el fondo del subsuelo estuviera a mayor profundidad). Y como antes, se requerirá para purificar ese flujo una extracción  $\beta R'$  en Alto. Se necesitará en total una extracción dada por  $R'(\alpha' + \beta)$  con  $\alpha' > 0$  y  $\beta > 0$  (el mismo valor que antes). Denominemos  $\kappa'$  a  $\alpha' + \beta$ . Si, como anteriormente, se desea mantener la producción de electricidad para usos distintos del bombeo, del yacimiento Alto habrá que seguir extrayendo  $H$ , además de  $\kappa' R'$ . El consumo total de agua podría llegar a ser ahora  $L + H + \kappa' R' + R' = L + H + (1 + \kappa') R'$ . Pero podemos fijar  $R'$  de modo que el agua disponible sea ahora la misma que en el caso anterior, de modo que podamos comparar en pie de igualdad ambas estrategias de explotación de los yacimientos:

$$L + H + \kappa R = L + H + (1 + \kappa') R' \quad \Rightarrow \quad R' = R \frac{\kappa}{1 + \kappa'} \quad (4)$$

Así la cosa, el yacimiento Alto gana agua a razón de  $C$  y pierde  $H + \kappa' R'$ . Por tanto en cada ciclo su ganancia es:

$$C - H - \kappa' R' = -\mathcal{P} - \kappa' R' = -\mathcal{P} - \frac{\kappa \kappa'}{1 + \kappa'} R \quad (5)$$

y como sólo es seguro que  $\kappa' > 0$ , el nuevo sistema podría ocasionar más o menos pérdida que el anterior. Ambos sistemas son equivalentes si  $\kappa = 1 + \kappa'$ . Si  $\kappa' < \kappa - 1$ , el reciclaje sin recarga es preferible. Pero quizás la conclusión más sorprendente es que tanto la recarga como el simple reciclaje conducen a agotar a mayor velocidad el yacimiento Alto. Parece que lo mejor es no hacer más inventos... salvo que se acepte disminuir el consumo eléctrico, es decir, el decrecimiento (algo blasfemo desde la óptica de la economía monetaria estándar).

Desafortunadamente para nuestros personajes, esta conclusión es nuestra (que vemos las cosas como un dios), pero podría no estar a su alcance. De hecho podría no aceptarse la mejor de las alternativas, pues los capitalistas razonarían que con la mejor alternativa su negocio disminuiría por un motivo evidente: ahora tendría que extraer menos agua, reduciendo su volumen de ventas, ¡una mala noticia monetaria! (Todo esto para el caso  $\kappa' < \kappa - 1$ .)

La conclusión más importante de lo anterior es la existencia de gradientes físicos (la diferencia de alturas en el caso del agua) que permiten valorar la exergía contenida en un determinado stock material, y por tanto la utilidad (si se trata de un valor positivo) o el coste de reposición o reciclado (si es un valor negativo) respecto del estado de referencia (la altura que ocupa la sociedad humana, por ejemplo). Y esto nada tiene que ver con los precios ni con los beneficios monetarios, sujetos a los vaivenes de los mercados... Disponiendo de información fiable sobre tales gradientes es posible plantear una gestión racional de un recurso, aun estando sujeta a incertidumbres. La gestión racional será una u otra según los propósitos que se persigan.

El curso de los acontecimientos que hemos seguido *es sólo uno de los posibles*, y ha venido configurado por las distintas decisiones *políticas* que la sociedad ha

tomado en cada encrucijada: el curso de la evolución no está dado de antemano: cualquier otra cosa hubiera podido pasar.

Un resumen de la historia se ofrece en la siguiente tabla:

Principales indicadores de cada ciclo solar			
Mundos	recursos disponibles		pérdidas
	agua	electricidad	de agua en Alto
<b>original</b>	$\mathcal{A} = L + C$	$\mathcal{E} = C(y_A - y_H)$	0
<b>extractivos</b> ( $H > C$ )...			
simple	$L + H > \mathcal{A}$	$Hh_A$	$H - C = \mathcal{P} > 0$
con recarga	$(L + H) + \kappa R > \mathcal{A}$	$Hh_A$	$\mathcal{P} + (\kappa - 1)R > \mathcal{P}$
con reciclaje	$(L + H) + \kappa R > \mathcal{A}$	$Hh_A$	$\mathcal{P} + \frac{\kappa\kappa'}{1+\kappa'}R > \mathcal{P}$
$\kappa > 1, \kappa' > 0, H > 0, R > 0, C, L, \kappa$ y $\kappa'$ son constantes positivas para cada mundo concreto.			
$\lim_{t \rightarrow \infty} Hh_A _{H>C} = 0. \quad Hh_A > \mathcal{E} \Leftrightarrow h_A > \frac{C}{H}(y_A - y_H)$			

¿Es imprescindible tanta fórmula para llegar a estas conclusiones? En realidad no. Hubiera bastado traducir el aforismo popular o el de Clausius a nuestro caso: “un yacimiento de agua sólo puede convertirse en electricidad una sola vez...”, “el agua nunca puede fluir espontáneamente de abajo hacia arriba...”

Cualquiera que sea el curso de los acontecimientos posteriores, todos pasan por una situación idéntica: en algún momento el yacimiento Alto se agota y la cantidad disponible de agua se reduce a  $L$ , y el mundo se queda sin electricidad por una temporada más o menos larga. La humanidad puede desaparecer o no en esa crisis, pero cuando menos su población se verá reducida a la que pueda mantenerse durante una temporada con sólo el agua de lluvia,  $L$ , y sin electricidad.

Otro curso diferente de los acontecimientos tendría lugar, si en el afán de aumentar la electricidad disponible en el mundo primigenio, alguien inventara un artefacto para capturar energía solar directamente, sin el concurso de la energía solar acumulada en el yacimiento Alto... Esta estrategia también serviría para reciclar, hasta su agotamiento, el yacimiento Bajo, usando energía solar para alimentar la bomba  $\mathbf{C}$ , lo que permitiría reducir la tasa de agotamiento del yacimiento Alto o incluso no usarlo en absoluto.

Pero, salvo que se use la energía solar para *producir* agua a partir de oxígeno e hidrógeno, la cantidad de agua total, de peso  $S$ , permanecerá invariable a *largo plazo*. Y ese es el agua disponible anualmente que es compatible con la estabilidad.

### 3. Yacimientos minerales

El caso de los yacimientos minerales, considerados en su conjunto, es esencialmente el mismo que el del recurso “agua” en el mundo fantástico anterior, salvo que mucho más complicado. Para empezar los minerales, y las sustancias puras a que da lugar su refinado, pueden emplearse para cumplir multitud de funciones. Por ejemplo, el petróleo: es un combustible ciertamente, pero su uso aparece tras cosas tan variopintas como un empaste dental sintético o en los

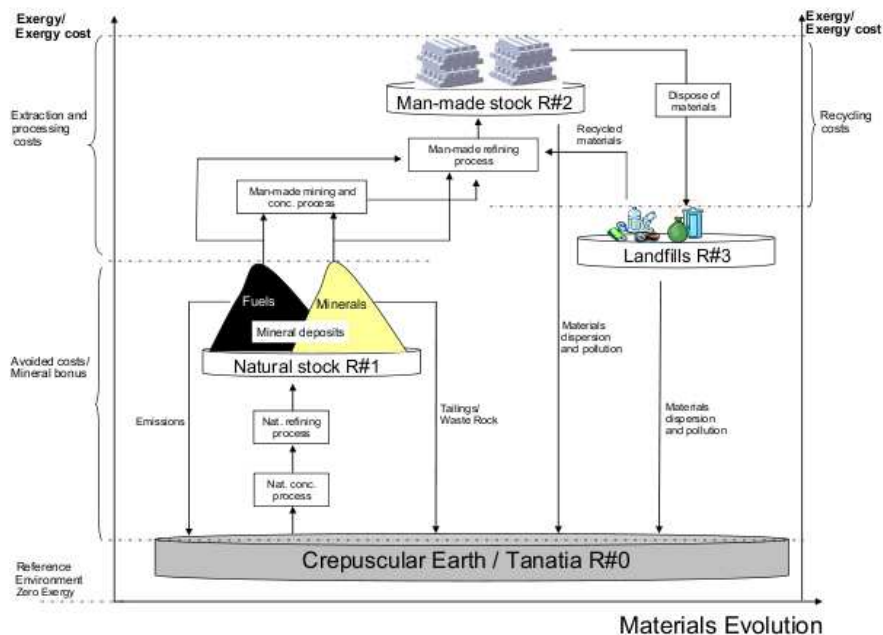


FIGURA 5: LA ALTURA EXERGÉTICA DE LOS MATERIALES

Se señalan cuatro posibles niveles de referencia para la medida de la “altura exergética” de un material (abstracto). Cuando se pasa de un nivel a otro inferior, se consume la exergía contenida en el material. Y al revés, cuando se pasa de un nivel a uno superior hay que aportar exergía adicional (realizar trabajo útil). Nótese el elevado contenido exergético de los yacimientos minerales (**R#1**): se trata de un regalo de la Naturaleza que, en principio, debería ser compartido por toda la humanidad. Nótese también que los vertederos (**R#3**) pueden sustituir con ventaja, como yacimientos artificialmente creados, a los yacimientos minerales. Al revés que en el mundo de la FIGURA 1, todos los niveles están por debajo del nivel “humano” (**R#2**). Figura original de Valero and Valero [2010b, Fig. 1; p. 231]

tejidos de nuestras ropas. Como el agua, los materiales tienen exergía gravitatoria, pero ésta no es en general de mucho uso por ser sólidos, y en cualquier caso resulta menor que las exergías de otros tipos. Pues los minerales contienen variados tipos de otras exergías: la química que nos permite quemar el petróleo o que nos exige gastar calor para extraer del mineral el metal correspondiente (exergía negativa), exergía de concentración (la ley de los yacimientos), etc, etc. Todas estas exergías pueden sumarse (con el signo debido en cada caso) y cada una de ellas se mide contra gradientes distintos de la altura: la concentración, la afinidad química, la temperatura, etc. Pero a fin de cuentas, una vez valoradas exergéticamente todas las formas en que pueden aportar trabajo útil (o exigir que lo hagamos nosotros), cada uno de los minerales tiene un exergía que podemos utilizar a modo de “altura energética”, de manera que la red conceptual de la sección anterior nos siga siendo de utilidad, véase la FIGURA 5.

### 3.1. La operación de las plantas mineras

En una planta minera, el material se encuentra con una elevada exergía gracias a procesos naturales mantenidos durante tiempos geológicos. La humanidad se ahorra así un gasto exergético muy considerable, al encontrarse el material de interés en el nivel **R#1**. Por referencia a ese *ahorro* es como debería fijarse el canon en las concesiones de explotación, puesto que el mineral en la mina debe considerarse un bien común de la humanidad, igual que consideramos, por ejemplo, la actual composición atmosférica, fruto igualmente de procesos biológicos acaecidos durante tiempos geológicos.

Si nos fijamos en el mineral de una mina particular y en el material que deseamos obtener, el proceso completo de una planta minera requiere la extracción de la mena (separación de la ganga) y la posterior obtención del material de interés (por separación y/o transformación). En definitiva acopiar el material en el nivel **R#2**. El resultado es un material de mayor altura exergética que el mineral de partida. Sin embargo, en el proceso de la minería no sólo interviene el material final, sino muchas otras sustancias cuya exergía final debemos contabilizar. Por ejemplo:

- La ganga puede dejarse inalterada, es decir, con la misma exergía de partida (o algo más pues, separada de la mena, su concentración ha aumentado). Pero también puede dispersarse en el ambiente en mayor o menor medida, de manera que su mezcla con otros materiales y la disminución de su concentración pueden significar una pérdida considerable de exergía, dejándola en un nivel intermedio entre **R#1** y **R#0**.
- El proceso de obtención del material de interés puede requerir el consumo de la exergía de otros materiales en el nivel **R#2**. Por ejemplo, puede requerir el consumo de combustibles, o de otros reactivos. Estos consumos sirven, desde luego, para aumentar la exergía, situando el material de interés en el nivel **R#2**, pero el consumo de la exergía de otros materiales puede superar con mucho esa ganancia.

En consecuencia, lo que importa es contabilizar todas las ganancias y pérdidas de exergía de todos los materiales involucrados. Si el resultado es una pérdida neta de exergía, el proceso minero es ineficaz, pues aunque parece proporcionar “valor” en forma del material de interés listo para usarse en el nivel **R#2**, en realidad destruye parte del capital exergético del planeta, es decir, disminuye la riqueza exergética disponible. El análisis exergético global del proceso, no sólo permite valorarlo desde el punto de vista ecológico, también mejorarlo, pues permite identificar los subprocesos que consumen exergía, haciendo posible su sustitución por subprocesos alternativos que minoren esa pérdida o incluso la eliminen totalmente. Por ejemplo, si un subproceso en el que se consume petróleo para producir calor se puede sustituir por el empleo directo de calor solar, la pérdida de exergía disminuirá, puesto que el calor proviene de una pérdida de exergía del Sol que se produciría igualmente.

El planteamiento exergético de una explotación minera no es muy distinto del planteamiento convencional que viene enseñándose en nuestras universidades. En éste se tienen en cuenta los principios de conservación de la masa y de la energía (por ejemplo, en las relaciones estequiométricas entre reactivos y productos, así como en los balances térmicos de las reacciones químicas involucradas). Pues bien, a ese tipo de análisis no hay más que añadir la Segunda

Ley de la termodinámica en la forma del balance neto de exergía. Dadas las ventajas señaladas de un análisis exergético, resulta sorprendente —si es que no es escandaloso— que estas nuevas herramientas no se hayan incorporado aún en los currícula de las escuelas de ingeniería de minas. . . “Nature cannot be compensated with money but with counteractions like recovering, restoring, recycling and reusing techniques” [Valero and Valero, 2010b, 230]

### 3.2. ¿Cuánto “yacimiento” nos queda?

Nosotros, al igual que nuestros semejantes en el mundo fantástico, también nos enfrentamos a un mundo que no podemos conocer completamente. No sabemos a ciencia cierta cuánto mineral hay en un yacimiento, tampoco cuánto hemos extraído hasta la fecha (el inventario sistemático del laboreo de los yacimientos, iniciado hace años, viene a suplir siquiera parcialmente, esta carencia). Hubbert [1958, 1962] ideó un método bastante razonable para estimar esos datos fundamentales (al menos para tener una idea de cuánto durará un determinado yacimiento). Partió de que la cantidad total sería prácticamente constante con el tiempo (en nuestra escala temporal, es decir, tiempos mucho menores que los geológicos) y del principio fundamental de la contabilidad: la suma de todas las extracciones desde el inicio de la explotación hasta el agotamiento final del yacimiento debería dar como resultado la cantidad total contenida en él. En definitiva, en una gráfica en la que se representara la cantidad total extraída desde el inicio hasta un cierto tiempo, se conoce el primer y el último punto de la curva, sin *más que suponer* la cantidad total contenida en el yacimiento. Además, la pendiente de esa curva (cualquiera que sea) sería la cantidad de mineral extraído por unidad de tiempo en cada tiempo de la historia del yacimiento. Podría haber supuesto que esa curva era una simple recta que unía los dos extremos conocidos, curva correspondiente a una extracción constante cada año. Esto último no se compadece con la experiencia de las minas reales, en las que se consigue al principio poca cosa, y se va aumentando la extracción conforme se va haciendo uno con la mejor manera de explotar el yacimiento. Hubbert tuvo la fortuna de dibujar la gráfica de las extracciones anuales y de imaginar que una campana de Gauss bien pudiera ser una curva apropiada para esa gráfica, es decir, para los valores de las pendientes de la gráfica de extracción acumulada en cada tiempo. De una a otra se pasa con facilidad por un par de fórmulas. La ecuación resultante depende de dos parámetros únicamente, que pueden ser estimados al ajustarlos a series anuales de extracción (si son conocidas). Los dos parámetros son significativos: uno es la cantidad de tiempo en que la extracción anual será superior a la mitad de la extracción máxima, el otro es el tiempo transcurrido desde el inicio de la explotación hasta que se alcance la máxima extracción anual. ¡Ajá! Mucha de nuestra incertidumbre (pero no toda) ha desaparecido, véase la FIGURA 6. Ajustes semejantes se disponen para los minerales de mayor importancia económica, véase la FIGURA 7.

Aunque el modelo de Hubbert se aplicó originalmente a cada par mineral/sustancia de interés, la contabilidad exergética permite agregar resultados y realizar la exploración para grupos o la totalidad de sustancias de interés. Particular es el caso de los minerales fósiles combustibles. En la medida en que podemos (hasta cierto punto) sustituir unos por otros, no nos interesaría el cenit de extracción de cada uno de ellos en particular, sino el de todos ellos, véase la FIGURA 8.

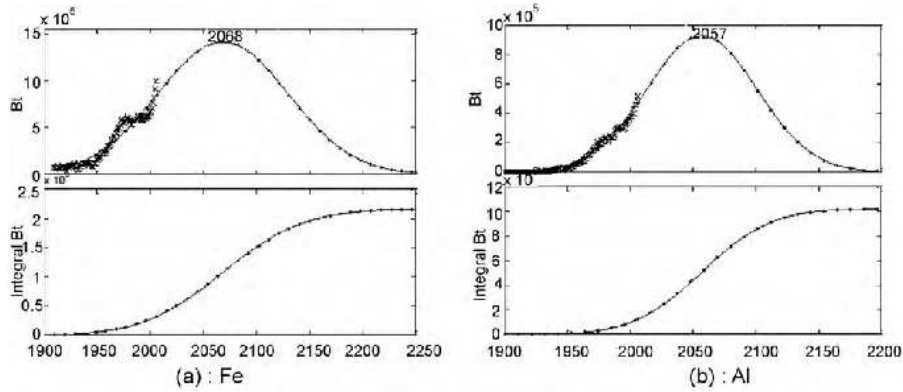


FIGURA 6: EL MODELO DE HUBBERT APLICADO A LA EXTRACCIÓN MUNDIAL MINERALES DE HIERRO Y ALUMINIO

Las cruces son los datos de extracción anual disponibles. Arriba, la curva de extracciones anuales que se ajusta con menor error a los datos. Abajo, la curva estimada que resulta para la extracción total realizada desde el inicio de la explotación. La cantidad total de mineral estimada es el área de la curva superior, o la máxima ordenada de la inferior. Figura original de Valero and Valero [2010a, Fig. 4 (parcial), p. 1080].

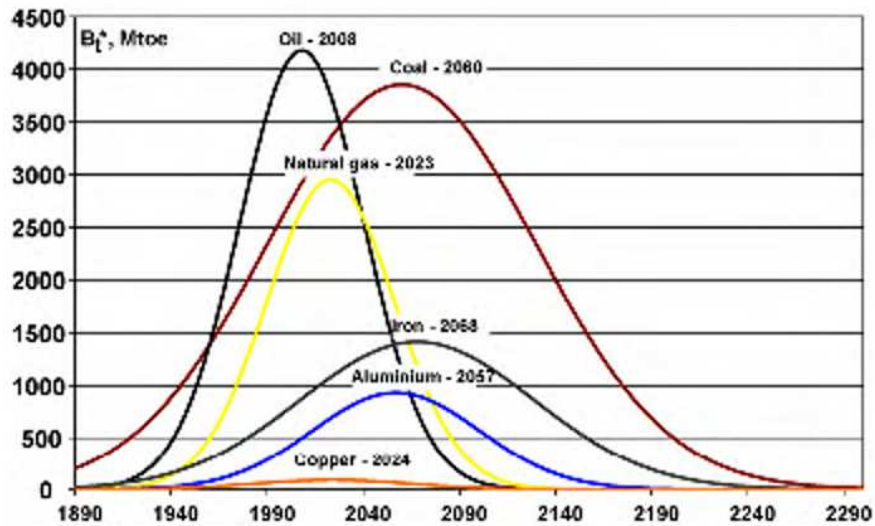


FIGURA 7: EL CENT EXERGÉTICO DE LOS MINERALES DE MÁS FRECUENTE EXTRACCIÓN

Figura original de Valero and Valero [2010a, Fig. 7, p. 1082].



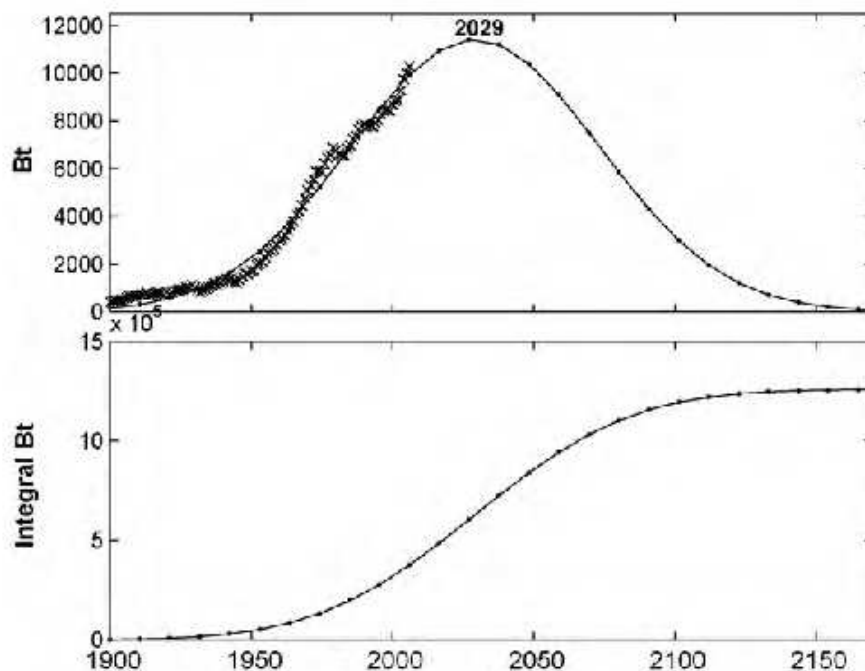


FIGURA 8: EL CENIT EXERGÉTICO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES CONVENCIONALES

Figura original de Valero and Valero [2010a, Fig. 6, p. 1082].

Este tipo de investigaciones está siendo llevado con vigor por Antonio Valero y su grupo en la Universidad de Zaragoza (CIRCE, antiguamente *Centro de Investigación del Rendimiento de las Centrales Eléctricas*), junto a otros grupos de investigación en el resto del mundo, poniendo a punto herramientas de análisis para múltiples aspectos de la gestión racional de las distintas etapas del proceso que va del mineral en la mina hasta la sustancia útil.

Cuando se ponen juntos todos los datos de los minerales no-combustibles para componer un cuadro de la situación, el aspecto resulta agri dulce en un primer vistazo, véase la FIGURA 9. Puede verse que mientras algunos minerales están prácticamente agotados (caso del mercurio y, en menor medida, del cinc de las baterías de Clausius), de otros parece que no debemos preocuparnos (quedan abundantes reservas, caso del yodo o del cesio). Sin embargo, para contemplar el cuadro hay que usar la perspectiva del “peor de los casos”. Ello por varias razones, siendo la principal que, en general, una sustancia no puede sustituir a otras en su función, cuando además en importantes procesos industriales tienen que concurrir varias de ellas simultáneamente, ya sea como reactivos o como catalizadores, para que el objetivo pueda lograrse. Aquí por tanto hay que emplear el conocido concepto de “factor limitante” de la ecología: todos aquellos procesos para los que alguna de las sustancias participantes está cerca del agotamiento (o, con una consideración prudentemente, se ha explotado más allá de la

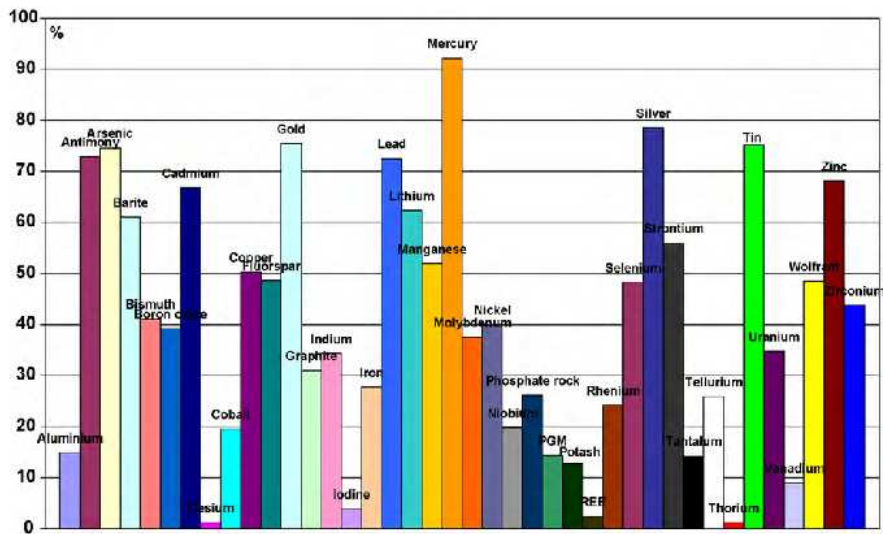


FIGURA 9: AGOTAMIENTO PORCENTUAL DE LAS RESERVAS MINERALES NO-COMBUSTIBLES

Figura original de Valero and Valero [2010a, Fig. 3, p. 1079].

mitad de sus reservas) están en “peligro”, a no ser que cambiemos de un modo bastante radical la gestión de los recursos. Puesto que actualmente la práctica corriente de extracción y refinado requiere consumir minerales combustibles, no es exagerado afirmar que en pocas décadas todos nuestros procesos industriales entrarán en una fase crítica (de seguir las cosas como hasta ahora), pues uno o varios de los materiales involucrados habrán superado el cenit de su máxima extracción.

#### 4. Algunas observaciones finales

La altura exergética de los yacimientos minerales (diferencia entre **R#1** y **R#0** en la FIGURA 5) es una suerte de servicio o regalo de la Naturaleza, pues evidentemente nos evita el formidable gasto de exergía en el que tendríamos que incurrir para elevar la sustancia de interés desde el nivel de referencia de un planeta “muerto” (**R#0**) con nuestra actual pericia técnica (que no es mucha, en realidad). Las concesiones mineras deberían pagar como canon el precio de esa cantidad de energía, puesto que ese monto debe ser considerado un bien común de la humanidad<sup>1</sup>. Por el contrario, si el canon es fijado por procedimientos monetarios (subasta, fracción del coste monetario de extracción o del precio de venta esperado, etc, etc), la empresa minera se apropia de un bien común y comercia con él para obtener beneficio, es decir, comportándose como un jugador ventajista.

<sup>1</sup>Por ejemplo, la Constitución brasileña de 1988 considera que la riqueza mineral del país pertenece al pueblo brasileño

De hecho, para evitar cometer algún error respecto a tales valoraciones, una concesión racional obligaría a la concesionaria a reponer en especie todo el material extraído o, cuando menos, a entregar materiales conteniendo una cantidad de exergía igual (y que no podrían haber sido extraídos de yacimientos minerales, sino producidos, quizás con el concurso de la exergía solar). Esto nos lleva a la obviedad de que cualquiera que sea el régimen de concesión o la forma de gestionar los yacimientos minerales (en tanto bienes comunales), el objetivo por el que debe evaluarse su éxito es la conservación del capital exergético de tales yacimientos. Es posible que nuevos métodos basados en la bioingeniería pueden utilizar la exergía solar para la reposición de los yacimientos, pero mientras que tales métodos no estén disponibles y puedan efectivamente ser utilizados, la prudencia aconsejaría exigir canones severos, aún a costa de obligar así al cierre de muchas explotaciones.

En nuestra actual situación, la extracción en yacimientos debería ser sustituida por la reutilización (el material no cambia de nivel, permaneciendo en el nivel “humano”, **R#2**). Y si hace falta más, recurriendo a los vertederos (reciclaje, nivel **R#3**), donde se encontrarán las sustancias de interés con un coste de transformación en general menor que el de los propios yacimientos, si su altura exergética es mayor que la de un yacimiento comparable.

La gestión tanto de la reutilización como del reciclaje debe ser objeto de especial atención. En general, la reutilización *instantánea* no es posible en general, de manera que dada la alta exergía de los materiales empleados en el nivel **R#2**, resulta inevitable que las cantidades no reutilizadas pierdan espontáneamente exergía a mayor o menor velocidad (oxidación, por ejemplo: ¡la Segunda Ley en acción!). Esa pérdida también se produce en el manejo artificial en los procesos de abatimiento de los residuos (vertederos, etc), y una gestión adecuada puede minorar esas pérdidas inevitables (véase el anejo A para el caso del aluminio). Especial atención debe ponerse en la separación en origen de los residuos, en la medida en que la mezcla de sustancias es una forma de consumo de exergía considerable. Bien que es verdad que tal separación es muy difícil o costosa, particularmente en determinados productos industriales, específicamente en los aparatos electrónicos de todo tipo. En este rubro, del mismo modo que se indicó para las concesionarias mineras, las empresas industriales deberían aceptar un canon para poder poner en circulación sus productos: el de asegurar que los residuos resultantes tienen una pérdida exergética limitada, o lo que es lo mismo, que son reciclables sin que para ello sea necesario superar un gasto límite de exergía (se trata de limitar la diferencia de altura exergética entre los niveles **R#2** y **R#3**). En todo caso debe tenerse en cuenta que “recycling bulk materials like iron or aluminium is profitable but recycling additives like Cr, Mo, Mn in steel, metallic pigments in paints or zinc in tires become quite difficult”, al menos actualmente [Valero and Valero, 2010b, 229].

Finalmente, cuando el recurso a los yacimientos minerales sea imprescindible, además de la fijación del pago del canon anteriormente mencionado, debería examinarse con detalle la destrucción de exergía ligada a los procesos de extracción, atendiendo a las particularidades de cada caso. En general, los yacimientos minerales están interconectados en tales procesos: sustancias de un yacimiento se emplean para el refinado de los minerales de otros, en general en todos se hace uso de minerales combustibles, directa o indirectamente. El análisis exergético de plantas [puesto a punto en el contexto de la ecología industrial, cf. Valero et al., 2010] debería ser un estándar de obligado uso, pues no sólo permite

reducir el consumo exergético en el proceso, reduciendo ineficiencias permite disminuir los costes monetarios asociados, lo que redundaría en el éxito de una empresa privada que acometa la tarea (y por tanto reduciría el riesgo de impago del canon comprometido en la concesión).

## Referencias

- R. Clausius. *Über die Energievorräte der Natur und ihre Verwertung zum Nutzen der Menschheit*. Verlag von Max Cohen & Sohn, Bonn, 1885.
- M.K. Hubbert. The Present World Energy Situation. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 8:1–12, 1958.
- M.K. Hubbert. *Energy resources. Rep. Comm. Nat. Resour., Natl. Res. Publ. 1000-D*, volume 4. National Academy of Sciences, Washington, DC, 1962.
- J. Naredo and A. Valero. *Desarrollo económico y deterioro ecológico*. Fundación Argentaria, Madrid, 1999.
- Alicia Valero and Antonio Valero. Physical geonomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion. *Resources, Conservation and Recycling*, 54:1074–1083, 2010a. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.02.010.
- Antonio Valero and Alicia Valero. Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the Earth’s mineral capital. the case of bauxite-aluminium and limestone-lime chains. *Energy*, 35:229–238, 2010b.
- Antonio Valero, Sergio Usón, César Torres, and Alicia Valero. Application of Thermoeconomics to Industrial Ecology. *Entropy*, 12:591–612, 2010. doi: 10.3390/e12030591.
- Alicia Valero Delgado. *Exergy evolution of the mineral capital on Earth*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering. Centro Politécnico Superior. University of Zaragoza, July 2008.
- Mariano Vázquez Espí. Arquitectura, economía y ecología. *Boletín CF+S*, 2000(14), 2000. URL <http://habitat.aq.upm.es/b/n14/>.

## A. Por ejemplo, el caso del aluminio

[Datos tomados de Valero and Valero, 2010b]

Metal: Aluminio, Al; el metal más abundante en la corteza terrestre. Substancia de referencia en **R#0**: sillimanita,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ . Mena en **R#1**: gibbsita,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Producto intermedio entre **R#1** y **R#2**: alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Proceso desde **R#0** hasta **R#2**: sillimanita  $\rightarrow$  gibbsita  $\rightarrow$  alúmina  $\rightarrow$  aluminio.

Exergía de concentración de la mena (gibbsita): 55,3kJ/kgAl. Exergía química de la mena: 37,0kJ/kgAl. Exergía total de la mena: 92,3kJ/kgAl (“altura” exergética respecto a **R#0**).

**Coste exergético de reposición de la mena.** Partiendo de las substancias de referencia más estables y abundantes para las especies involucradas (sillimanita para Al, agua para H), con las tecnologías actuales la reposición de gibbsita en el estado de **R#1** requeriría 103,7MJ/kgAl. Nótese que el coste de reposición de la gibbsita es más de 1.000 veces su exergía con la tecnología actual, lo que da idea de lo lejos que estamos de un proceso reversible. Nótese también que la ruta de reposición alternativa, a saber, concentrar las pequeñas cantidades de gibbsita contenidas en la corteza terrestre hasta su concentración media en los yacimientos, es más costosa (a pesar de ser más simple), no menos de 626,6MJ/kgAl.

Finalmente, el **coste exergético de producción de aluminio** a partir de la gibbsita es como mínimo de 288MJ/kgAl con las tecnologías actuales.

¿Cuál es la pérdida total de exergía en la que incurrimos al dispersar el aluminio producido, haciendo imposible su reutilización y/o su reciclaje? O, lo que es lo mismo, ¿cuál es el coste de reposición del aluminio al nivel **R#2** una vez dispersado hasta el nivel **R#0**? No menos de 392MJ/kgAl.

En la notable tesis doctoral de Alicia Valero Delgado [2008] se encontrará abundante información para efectuar el análisis exergético de los yacimientos minerales más comunes, así como multitud de ejemplos y referencias adicionales.