

Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo

Thanatia

Límites
materiales
de la transición
energética

ALICIA VALERO
ANTONIO VALERO
GUIOMAR CALVO

Thanatia

Límites materiales
de la transición energética

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

- © Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo
- © De la presente edición, Prensas de la Universidad de Zaragoza (Vicerrectorado de Cultura y Proyección Social)
1.ª edición, 2021

Prensas de la Universidad de Zaragoza. Edificio de Ciencias Geológicas, c/ Pedro Cerbuna, 12
50009 Zaragoza, España. Tel.: 976 761 530
puz@unizar.es <http://puz.unizar.es>



Esta editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.

ISBN: 978-84-1540-365-2

Impreso en España

Imprime: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

D. L.: Z-1355-2021

¿DE QUÉ TRATA ESTE LIBRO?

Todo lo que nos rodea está compuesto por minerales. En teléfonos móviles, electrodomésticos, vehículos, hormigón, pinturas, detergentes... se emplean decenas de elementos químicos que provienen de la extracción y procesamiento de estos minerales. Partimos de la ventaja de que los procesos naturales que se han sucedido a lo largo de millones de años en nuestro planeta han ido concentrando estos elementos en forma de depósitos. La minería es nuestra fuente primaria, de donde extraemos los minerales a los que luego les damos utilidad. Dado que estas minas no son infinitas, es lícito plantearse qué limitaciones pueden existir a corto, medio y largo plazo.

El aumento de la población, la globalización y el cambio en las tendencias de consumo están haciendo que cada año se incremente notablemente el uso de recursos. En efecto, la extracción primaria de productos de cantera, minerales metálicos, combustibles fósiles y biomasa no hace más que crecer con el paso de los años. En un planeta limitado, ¿vamos a ser capaces de mantener este ritmo eternamente? ¿Qué consecuencias tendrá sobre las generaciones futuras y sobre el planeta?

Históricamente, la extracción y el uso de materias primas han estado estrechamente vinculados al desarrollo del ser humano. De los aproximadamente 3 kilos de recursos naturales que consumíamos en la Prehistoria por habitante y día hemos pasado a 44 kilos en esta sociedad industrializada (Friends of the Earth, 2009). Nuestros antepasados prehistóricos obtenían recursos minerales mediante recolección en superficie, seleccionando aquellos materiales más adecuados para servir como herramientas de corte, tales como la cuarcita o el sílex.



Figura 1. Antigua explotación a cielo abierto del Imperio romano de Las Médulas (Castilla y León, España). Autor: Rafael Ibáñez Fernández. GNU FDL. Wikimedia Commons.

Otros materiales fáciles de conseguir se han empleado históricamente como cosméticos y para decoración. Los egipcios ya empleaban mezclas de aceites con polvo procedente del triturado de minerales de plomo, como la galena, y de cobre, como la malaquita, entre otros, para fabricar el *kohl*, una sustancia negra y espesa que posteriormente aplicaban para perfilarse los ojos (Hallmann, 2009).

Con el surgimiento de sociedades más complejas, la minería se fue convirtiendo en algo mucho más relevante, empleando los materiales no solo para consumo propio sino también para intercambio. Distintos metales fueron poco a poco cobrando más peso, entre ellos el cobre, el bronce, una aleación de cobre y estaño y, por supuesto, el oro, muy deseado tanto para ornamentación y joyería como por su valor estético y económico.

Un ejemplo muy conocido a nivel global es la antigua explotación de oro de Las Médulas, situada en la provincia de León (España), considerada la mayor mina de este metal a cielo abierto del Imperio romano (Figura 1). La explotación se llevó a cabo mediante la fuerza del agua, con el método conocido como *ruina montium*. El agua se canalizaba y se acumulaba en la parte superior de la montaña y, al ir soltando esta agua a través de galerías con elevada pendiente, y mediante la



Figura 2. Grabado procedente de la obra de Georgius Agricola, *De re metallica* (1577) donde se representan las técnicas en extracción de oro en Alemania en el siglo XVI. Por un lado, las canaletas de resaltes hacían que el oro, más denso, se fuera acumulando en los canales; por otro, se ve una persona bateando, método tradicional que todavía se emplea en algunos lugares.

fuerza de la gravedad, se iba deshaciendo la montaña, arrastrando el oro hasta los lavaderos situados en la parte inferior (Sánchez-Palencia *et al.*, 1998). Se calcula que los romanos pudieron llegar a extraer entre 5 y 7 toneladas de oro de este lugar, lo que ha dejado como herencia el tan característico paisaje que presenta esta zona; tal es el valor de este espacio natural que fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1997.

Históricamente, también se ha obtenido el oro que aparece en estado nativo de forma manual mediante bateas. Esta técnica, muy extendida en siglos pasados, consistía en llenar de arena una batea y sumergirla en agua; mediante una serie de movimientos circulares, y debido a la diferencia de densidad de los materiales, el oro se depositaba en el fondo mientras la grava se iba desprendiendo (Figura 2). Esta misma técnica se empleó también durante la fiebre del oro en Estados Unidos a mitad del siglo XIX, junto a las canaletas con resaltes, donde se lavaba el material. Durante esta época también se hizo popular el lavado de oro en seco, impulsado por la falta de agua en muchas regiones; en este caso, el mineral se depositaba dentro de una batea de madera cónica y, lanzando el material al aire, los materiales más ligeros se iban volando, quedando los más pesados en el fondo del recipiente. Sin embargo,

como se puede suponer, no era un método muy eficaz, ya que así solo se podían recuperar grandes pepitas de oro (Taylor Hansen, 2007). En la actualidad, en la minería artesanal de oro se siguen empleando bateas y decantación en canales.

El avance tecnológico que ha tenido lugar con el paso de los siglos ha ido incrementando progresivamente el número de metales y otros elementos que se emplean, pasando en tan solo unos pocos en el siglo XVII hasta la práctica totalidad de los contemplados en la tabla periódica hoy en día. Esto resulta aún más evidente en el caso de elementos que se emplean en el sector energético (Zepf *et al.*, 2014). Inicialmente, los materiales necesarios para fabricar molinos que aprovechaban la energía del viento eran pocos, básicamente hierro, madera y piedra; lo mismo sucedía con las velas o lámparas de aceite que servían para iluminar. Con la revolución industrial y la invención de la máquina de vapor se introdujeron otros elementos en el sector energético: el cobre, el estaño, el plomo, manganeso, etc., pero seguían siendo tan solo unos pocos. La aparición de los vehículos a motor hizo cambiar de nuevo la situación drásticamente, aumentando no solo el consumo de combustibles fósiles, sino también el de otros metales que hasta el momento no habían tenido gran utilidad.

Hoy en día empleamos multitud de elementos en distintas aplicaciones que nos simplifican y facilitan la vida. Así, en un teléfono móvil, podemos encontrar varias decenas de elementos de la tabla periódica, que incluyen desde un óxido de estaño e indio que hace que la pantalla sea táctil hasta las tierras raras que producen los colores que vemos y, el más conocido de todos, el litio de las baterías (Merchant, 2017).

La generación de electricidad tampoco es una excepción ya que es un sector que exige grandes cantidades de elementos, algunos de ellos muy valiosos y escasos, para la fabricación de aerogeneradores, paneles fotovoltaicos, etc. Por ejemplo, para producir un gigavatio (GW) de potencia eléctrica equivalente a la que podría suministrar una central térmica que funcione con gas natural, harían falta un total de 200 aerogeneradores de 5 megavatios (MW) o 1000 aerogeneradores de 1 megavatio (MW). Esto implicaría el uso de aproximadamente 160 000 toneladas de acero, 2000 de cobre, 780 de aluminio, 110 de níquel, 85 de neodimio y 7 de disprosio para su construcción. Unas cantidades nada despreciables si se estima que en un futuro la energía producida por los aerogeneradores en el año 2050 podría rondar los 2200 GW (International Energy Agency, 2019a).

Y lo que es peor, como se puede ver en la Figura 3, los aerogeneradores son una de las tecnologías renovables que menor variedad de elementos requiere para su fabricación, pero otras como el coche eléctrico, emplean más de una cuarentena de elementos diferentes, y esto sin considerar el resto de los materiales necesarios como plásticos, vidrios, polímeros, etc. (Valero *et al.*, 2018b).



Figura 3. Algunos de los elementos que se emplean para la fabricación de tecnologías verdes. Figura elaborada a partir de Valero et al. (2018b).

Teniendo en cuenta la intensidad en el uso de materiales de las tecnologías limpias, ¿será posible el despliegue de energías renovables necesario para alcanzar el objetivo alcanzado por el Acuerdo de París de evitar el aumento de temperatura del planeta de más de 2 °C antes de finales de siglo?

Queremos pasar de una sociedad basada en fuentes no renovables de energía a una basada en fuentes renovables, sin embargo, lo que rara vez se tiene en cuenta es que estas tecnologías requieren una mayor diversidad de materiales que las fuentes de energía convencionales y que, además, son altamente voraces en muchos elementos distintos.

Se puede decir que nuestra sociedad, tal y como la conocemos, es totalmente dependiente de muchos elementos, de los que casi la totalidad proceden de la extracción primaria en las minas y del procesado posterior en fundiciones y refinerías. Los minerales son por tanto un componente vital, ya que están presentes en todos los productos que empleamos; no existe ningún producto en el que no se empleen minerales de forma directa o en el que no hayan sido empleados para su fabricación.

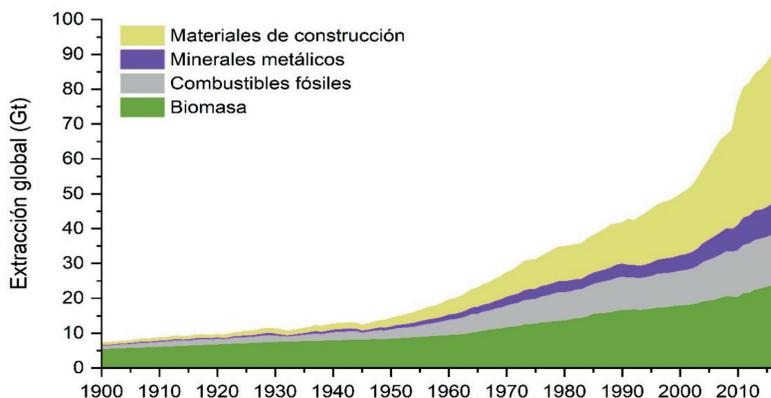


Figura 4. Extracción global de materiales desde el 1900 hasta 2017 en gigatoneladas (International Resource Panel, 2019).

Como consecuencia de ello, la extracción de recursos naturales a nivel mundial no ha hecho más que aumentar de forma exponencial, tal y como se puede ver en la Figura 4. La cantidad de biomasa que se ha extraído, si comparamos los datos de 1900 con los de 2017, se ha multiplicado por cinco, en el caso de los combustibles fósiles por quince, y por 43 y 65 en el caso de minerales metálicos y de construcción, respectivamente (International Resource Panel, 2019). Sin ir más lejos, en lo que llevamos de siglo XXI (en 20 años), hemos extraído casi la misma cantidad de cobre que se extrajo en todo el siglo XX, y esta misma situación se puede extrapolar a otros muchos elementos (USGS, 2018).

Sin embargo, esta extracción de materias primas no está repartida de igual forma a lo largo del globo. En el caso de los recursos minerales, es la geología la que condiciona los lugares donde se han ido concentrando los elementos con el paso del tiempo. En Australia por ejemplo existen yacimientos económicamente rentables de prácticamente todos los elementos, mientras que, en España, a pesar de contar con diversos depósitos minerales de distintos elementos, tan solo se extraen unos pocos metales básicos como el cobre, el plomo o el zinc por motivos económicos.

Si tomamos como ejemplo alguno de los elementos que van a ser más importantes para nuestra economía, como es el caso del litio, fundamental para las baterías de los coches eléctricos, aproximadamente el 55 % de la extracción total mundial tuvo su origen en Australia en el 2019. Otro ejemplo representativo de ese mismo año son las tierras raras, empleadas en multitud de aplicaciones tecnológicas; en este caso China dominó el mercado con una cuota de extracción superior al 60 % a nivel global (USGS, 2020).

Además, esta extracción desigual de recursos viene asociada a un consumo que también está repartido de forma desigual. Por ejemplo, en Europa se consumen tres veces más recursos que en Asia, y cuatro veces más que en África, y alguien nacido en Estados Unidos consume incluso más que un europeo medio. Por ejemplo, un niño estadounidense nacido en 2019, necesitará a lo largo de su vida (78,6 años) un total de 9129 kilos de hierro, 937 kilos de aluminio primario, 444 kilos de cobre, 432 kilos de plomo, 211 kilos de zinc, 13 693 kilos de sal, 6503 kilos de roca fosfórica, entre otros muchos elementos, además de unos 1800 barriles de petróleo, 150 toneladas de carbón y 7,7 millones de metros cúbicos de gas natural (Minerals Education Coalition, 2019). Esto implica que, si todos los habitantes del planeta intentáramos vivir hoy como un estadounidense medio, necesitaríamos multiplicar por dos la extracción actual de cobre para cubrir la demanda de un solo año y algo similar ocurriría con el resto de las materias primas.

La extracción exponencial de materiales conlleva asimismo un aumento de la energía necesaria dedicada a la minería, lo que a la vez puede llegar a generar en algunos casos serios impactos ambientales en el medio. Según estudios de la Agencia Internacional de la Energía, la industria minera consume entre el 8 y el 10% de la energía global. Como ejemplo de lo intensiva que es la minería en cuanto al uso de energía, cada año, la industria minera de Australia consume tanta electricidad como Portugal, y si se considera además el coste del transporte, se equipara con la energía consumida en toda España. Queda claro que no puede haber materiales sin energía, pero tampoco puede haber energía sin materiales.

¿Y cómo se vislumbra el futuro? Conocer el consumo de recursos minerales en el pasado o en el presente es relativamente sencillo, tan solo hace falta recurrir a las estadísticas mineras de los diferentes países para poder tener cifras aproximadas. Sin embargo, tan importante o más es tratar de predecir cuál va a ser el comportamiento futuro para poder anticiparnos a eventuales problemas de escasez. Para ello, se han creado diferentes modelos basados en cálculos estadísticos y análisis de tendencias, entre otros. De estos estudios se pueden destacar algunos resultados llamativos. En el caso de la plata, el oro, el cobre o el níquel, se estima que su demanda se habrá multiplicado por cinco de aquí a 2050. Por sí sola, esta cifra no dice nada, pero si se compara con la cantidad conocida de estos elementos en las minas hoy en día, supera por mucho la cantidad que sería posible y rentable extraer con los precios actuales (Halada *et al.*, 2008). Esto implica que vamos a terminar necesitando mucho más de lo que la Tierra nos puede dar y que los auténticos costes del agotamiento de los recursos naturales no renovables, y la consecuente degradación de los ecosistemas será mucho mayor y seguirá aumentando si la tendencia se mantiene.

En definitiva, la Tierra se ha convertido en una gran mina, donde no solo se extraen gran cantidad de elementos, también se generan millones de toneladas de roca estéril que se acumulan en los alrededores de las minas. En el año 2000 el procesado y refinado de minerales fue responsable de alrededor del 12% de las emisiones de dióxido de azufre, un gas que es el principal causante de la lluvia ácida (Smith *et al.*, 2004). A esto hay que añadir el impacto paisajístico que tienen las minas, el impacto sobre los usos del terreno o la posibilidad de accidentes como el ocurrido en Brasil a principios de 2019 donde colapsó un dique de contención de una mina de hierro provocando graves daños, tanto en pérdida de vidas humanas como en términos materiales y medioambientales.

En efecto, la naturaleza ya no es tan abundante como antes, si lo fuera, tal vez la contribución de la minería no sería tan devastadora. Sin embargo, el intenso desarrollo tecnológico del siglo XXI está obligando a la sociedad a reaccionar, siendo cada uno de nosotros cada vez más conscientes de los efectos negativos que estamos causando en el planeta.

Otra reacción a la extracción exponencial es la estimulación de la conciencia global de que se está produciendo una pérdida de capital natural que no puede ni podrá ser nunca regenerado. En otras palabras, que existen límites al crecimiento. De hecho, muchas décadas atrás esto quedó en evidencia con el informe al Club de Roma del libro *Los límites del crecimiento* (Meadows *et al.*, 1972), partiendo de un informe realizado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, libro que se actualizó en el año 2004 (Meadows *et al.*, 2004). En él se predecía que el crecimiento de la población, unido al uso exponencial de combustibles fósiles y minerales, conduciría al mundo al borde del colapso en tan solo unas pocas generaciones. Esta predicción se fue haciendo cada vez más real, especialmente con la posterior crisis del petróleo en los años setenta y ochenta, solo para ser olvidada durante el auge de la burbuja de finales de los noventa y principios del 2000. En aquel momento, el crecimiento mundial se impulsaba por las ideas de que el planeta podía absorber todos los impactos ambientales causados por el desarrollo social, que los recursos minerales y energéticos eran suficientes para mantener un crecimiento ilimitado y que la innovación y el desarrollo tecnológico serían capaces de resolver los problemas ya existentes o futuros.

Mirando atrás, la falta de datos precisos que generaron esas predicciones tempranas sobre la escasez futura no debilita el mensaje del Club de Roma. Los problemas ambientales a escala mundial han ido empeorando y la huella ecológica generada por la población del planeta está ya sobrepasando los límites de lo que la Tierra puede soportar.

Se conoce como «día de sobrecapacidad de la Tierra» al día en el que se han consumido todos los recursos que es capaz de regenerar la Tierra en un año

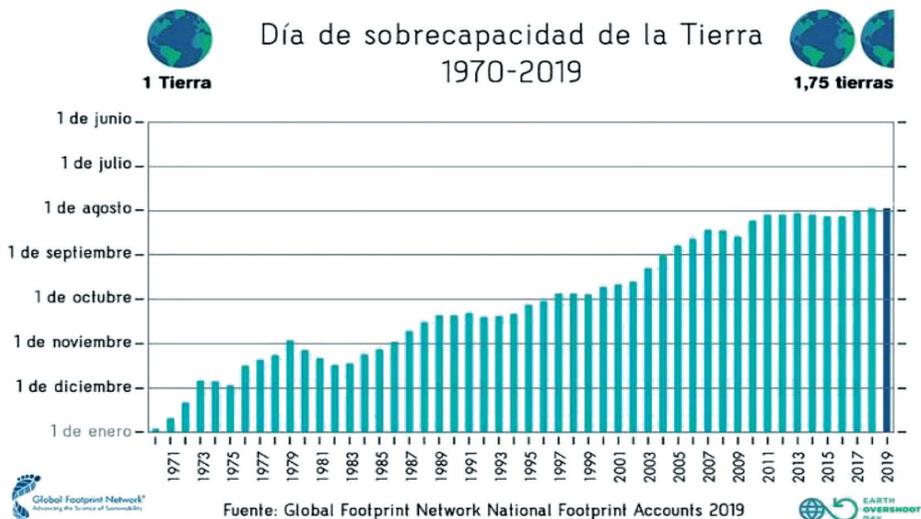


Figura 5. Evolución del día de sobrecapacidad de la Tierra desde 1970 hasta 2019 (Global Footprint Network: <www.footprintnetwork.org>).

(Figura 5). Es decir, si mantuviéramos un ritmo sostenible de consumo y generación de residuos que nuestro planeta fuera capaz de absorber, este día se produciría el 31 de diciembre. Ya en 1970 este límite de sobrecapacidad se alcanzó el 23 de diciembre, una fecha no muy alejada; sin embargo, en el año 2019 el límite del planeta se alcanzó el 1 de agosto. En 2020 este límite se alcanzó el 22 de Agosto, varias semanas después, principalmente debido a la pandemia global, que hizo que el consumo de materiales disminuyera hasta niveles similares a hace quince años (Earth Overshoot Day, 2019). ¿Qué significa esto? Básicamente viene a decir que cada año necesitamos 1,75 planetas para mantener nuestro ritmo de crecimiento, pero como todos sabemos, tan solo tenemos uno (WWF, 2018). Además, debido a la distribución desigual del consumo, si todos los habitantes del planeta quisieran vivir al nivel de un español medio, harían falta dos planetas y medio, cifra que se incrementaría hasta los cinco planetas si todos quisiéramos vivir al mismo nivel que un estadounidense.

La mochila ecológica de cada uno de nosotros no hace más que aumentar, y lo hace de forma todavía más considerable en el caso de países en vías de desarrollo, que buscan ponerse al mismo nivel que los países ricos. El gran despliegue esperado de las energías renovables va a afectar también al tipo de materiales que se extraen, produciendo un cambio de dependencia en los combustibles fósiles hacia una dependencia en materiales escasos, como analizaremos más adelante.

Aunque muchos continúan negando la existencia de la escasez de materiales y la necesidad de abordarla desde un punto de vista económico, el hecho es que el agotamiento físico está relacionado con la cantidad limitada de recursos naturales que tiene la Tierra. Si esta amenaza se quiere tomar en serio, es necesario empezar a contabilizar de forma rigurosa qué materias primas se producen, desde su extracción primaria hasta la fabricación del producto final, y luego desde su desecho hasta la dispersión total.

Un seguimiento de este tipo podría llevarse a cabo mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), metodología ampliamente establecida para evaluar la mochila ecológica y los impactos ambientales asociados desde el inicio de un bien o servicio, la llamada «cuna», hasta el final de su vida, la «tumba». Este análisis de la cuna a la tumba, y también en el sentido inverso, se puede ampliar hasta abarcar el planeta entero, de esta forma, y aplicado a la extracción de recursos minerales, se puede analizar la pérdida de riqueza mineral causada por la acción del ser humano.

Con esta idea en mente, la termodinámica, y concretamente el segundo principio, nos permite explicar de una forma física cualquier proceso de degradación. El objetivo final es poder llevar a cabo un análisis termodinámico del agotamiento de las materias primas en la Tierra mediante su ciclo de vida completo, es decir, de la cuna a la tumba, y después desde esa tumba hasta la cuna otra vez. Este proceso cíclico ocurre de forma natural en los ecosistemas si transcurre el tiempo suficiente y gracias a la acción del Sol. Sin embargo, el Sol no tiene apenas influencia en el ciclo de los minerales, y una vez estos entran en la tecnosfera (sistema formado por todos los elementos creados por el ser humano), terminan dispersándose, no volviendo a estar casi nunca disponibles para su reutilización.

El ciclo de los minerales es mucho más complejo, y el ser humano lo está acortando a su antojo. Los minerales, concentrados en yacimientos, se pueden considerar como el gran almacén que dispone la naturaleza. Este almacén, una vez extraído y procesado, pasa a formar parte de la industria. Tras la fabricación de los productos, los minerales ya pertenecen a las existencias (o *stock*) que están en uso y al llegar al final de la vida útil de dichos productos, es decir, cuando la sociedad ya no los necesita, suelen acabar en vertederos o, en el mejor de los casos, reciclados. En los vertederos, los elementos acaban dispersándose, por lo que su recuperación es prácticamente imposible y, en el caso del reciclado, tampoco se puede alcanzar la máxima recuperación. Por tanto, en vez de un ciclo como tal, la vida de estos materiales puede ser representada a través de una espiral que no se cierra, dado que ni siquiera aplicando las mejores técnicas de reciclado, es posible recuperar la totalidad del material empleado para su fabricación por limitaciones termodinámicas.

Hoy en día se extraen grandes cantidades de minerales sin considerar este proceso de dispersión, algo que se podría evitar si se llevaran a cabo estudios sobre los costes de recuperación tanto actuales como en el futuro. Conocer, o al menos tener un orden de magnitud, de cuáles son los costes de tratar de cerrar estos ciclos, es decir, estimar cuál sería el coste de volver a reconcentrar esos minerales dispersados por el ser humano en un yacimiento, puede ser de gran ayuda para comprender la dimensión del problema. Solo así entenderemos la necesidad de administrar adecuadamente los recursos escasos que nos brinda la naturaleza sin pedir nada a cambio.

En un estudio a nivel planetario de la cuna a la tumba, y luego de la tumba a la cuna, es necesario identificar con claridad qué es la cuna y qué es la tumba. La cuna es algo sencillo de determinar en este caso, es el almacén en el que están inicialmente los minerales, que han sido concentrados a través del tiempo mediante procesos naturales, es decir, son los yacimientos minerales y las minas. Extrapolando esta idea a todos los recursos minerales que emplea el ser humano, la cuna es entonces la Tierra tal y como la conocemos hoy en día. La tumba, sin embargo, es algo más compleja de definir. Cuando se analiza el ciclo de vida de un material, la tumba es normalmente el vertedero en el que terminan; estableciendo un símil, a nivel planetario, la tumba podría ser el vertedero definitivo y final donde todos los recursos se han dispersado de forma irreversible, es decir, un planeta comercialmente muerto en recursos. Para poder desarrollar esta hipótesis de una tumba planetaria, es necesario crear un modelo que sea capaz de representar adecuadamente el fin comercial del planeta y para ello, se plantea el modelo de *Thanatia* (Valero y Valero, 2014a).

La palabra *Thanatia* procede del griego *thanatos*, que significa muerte, y representa una tierra hipotética donde todos los materiales concentrados se habrían extraído y dispersado por toda la corteza donde, además, también todos los combustibles fósiles se habrían consumido (Figura 6).

Esta tierra crepuscular tendría una atmósfera, una hidrosfera y una corteza continental con una composición determinada pero distinta a la actual. Por ejemplo, al no existir en ella depósitos concentrados de minerales y al haberse quemado todos los combustibles fósiles, la atmósfera tendría unas concentraciones de CO₂ más elevadas que las actuales. Del mismo modo, casi toda el agua disponible en la hidrosfera tendría una composición diferente al haberse mezclado las aguas dulces (que representan tan solo un 3,5 % de las aguas totales del planeta) con las saladas. Este modelo no significa que *Thanatia* sea el fin de la vida de nuestro planeta, solamente implica que los recursos ya no estarían disponibles en su forma actual, concentrados y listos para su extracción.



Figura 6. Reloj de arena conceptual del tránsito de Gaia (nuestro planeta en la actualidad) a Thanatia (planeta con los recursos naturales dispersos y/o consumidos totalmente).

Partiendo entonces de *Thanatia*, resulta sencillo evaluar el coste de reposición de los minerales a través de un enfoque de la tumba a la cuna, ya que este coste sería el correspondiente a la energía útil necesaria para volver a concentrar esos minerales hasta la concentración que aparece en sus respectivos yacimientos, es decir, pasar de un ambiente disperso como el de *Thanatia* hasta la concentración de las minas actuales. Para poder tener una visión unificada y realizar comparaciones entre distintos recursos y países, se emplea como unidad de medida la exergía, que además nos ayuda a tener en cuenta no solo la cantidad sino también la calidad de estos recursos.

Es fundamental tener en cuenta que la calidad de los recursos minerales no es siempre la misma, es decir, no tiene sentido sumar una tonelada de hierro con una tonelada de oro, sería como sumar peras y manzanas, puesto que los procesos involucrados en la extracción y procesado no son comparables en absoluto. Por este motivo, la exergía y en concreto los costes de reposición, contemplan los términos no solo de calidad sino también de cantidad lo que nos permite sumar manzanas con manzanas.

De esta forma, empleando el modelo de *Thanatia*, un planeta donde no existen minas de las que podamos extraer los elementos, y la exergía, se puede evaluar la pérdida mineral causado por la extracción pasada, y también de la que está por venir.

Todos los conceptos involucrados en este proceso, el ciclo de los materiales, el análisis de ciclo de vida de los recursos minerales, la exergía, los costes de reposición, etc., se irán explicando de forma detallada a lo largo del libro mediante aplicaciones y casos prácticos, centrados en la evaluación termodinámica de los recursos minerales, de la transición energética y de las tecnologías.

Vistas las tendencias actuales de extracción de materiales, queda claro que el agotamiento de los recursos minerales no parece ser un objetivo prioritario, pero para evitar que nuestro planeta termine transformándose en *Thanatia* hace falta actuar ya.

ÍNDICE

1. ¿De qué trata este libro?.....	9
2. La voracidad mineral del ser humano.....	23
2.1. Demanda de combustibles fósiles.....	24
2.2. Demanda de minerales	26
2.3. Algunos minerales estratégicos para el presente y el futuro.	28
2.3.1. Un clásico: el oro	28
2.3.2. Tierras raras y esenciales.....	30
2.3.3. Materiales tecnológicos: cobalto, litio, niobio y tántalo	32
2.3.4. Indio, galio y telurio: los nuevos horizontes de la	
fotovoltaica.....	34
2.3.5. El fósforo: el próximo oro verde	35
2.4. Criticidad de minerales.....	35
3. Sobre la disponibilidad de recursos en la Tierra.....	43
3.1. Clasificación de los recursos	43
3.2. Formación y disponibilidad de combustibles fósiles	46
3.3. Formación y disponibilidad de minerales no energéticos .	50
3.4. Extracción y procesamiento de minerales	58
3.4.1. Exploración e investigación	59
3.4.2. Desarrollo	60
3.4.3. Explotación: extracción y beneficio.....	62
3.4.4. Explotación: fundición y refinado pirometalúrgico	64
3.4.5. Explotación: refinado hidrometalúrgico	66
3.4.6. Ejemplo: el procesamiento del cobre.....	68
3.4.7. La mixología metálica.....	70
3.4.8. Cierre y restauración.....	72
3.5. Impactos ambientales de la minería	73
3.6. Impactos sociales de la minería	79

4. El valor (termodinámico) de la escasez	83
4.1. El ciclo de los materiales	83
4.2. Thanatia	89
4.3. Energía necesaria para extraer minerales de Thanatia	96
4.4. Termoeconomía, exergía y coste exergético	100
4.5. Exergoecología.....	104
4.6. Exergía de los recursos minerales	104
4.6.1. Exergía química.....	106
4.6.2. Exergía de concentración	108
4.6.3. Exergía de conminución	109
4.6.4. Exergía contenida en los recursos minerales del planeta.....	111
4.7. Coste exergético de reposición	115
4.7.1. Costes exergéticos de reposición como indicador del valor físico de los recursos	118
4.7.2. Asignación de costes en minería y metalurgia	121
4.8. Rareza termodinámica.....	129
4.8.1. Rareza termodinámica como indicador de criticidad	134
4.8.2. La necesidad de la reciclación	137
5. Evaluación termodinámica de la pérdida de recursos minerales... ..	141
5.1. Evolución exergética de la extracción histórica mundial de minerales.....	142
5.2. Evolución exergética de la extracción futura de los minerales	149
5.3. La balanza mineral de países y regiones	160
5.3.2. España y Colombia.....	161
5.3.2. Latinoamérica	164
5.3.3. Europa.....	167
5.4. Vendiendo catedrales al precio del ladrillo	169
6. Límites materiales de la transición energética	173
6.1. Los Acuerdos de París y los escenarios climáticos.....	173
6.2. Generación de energía procedente de fuentes renovables.. ..	178
6.2.1. Biomasa.....	178
6.2.2. Energía eólica	180
6.2.3. Energía hidroeléctrica.....	182
6.2.4. Energía solar.....	184
6.2.5. Energía de los océanos.....	187
6.2.6. Energía geotérmica	190
6.2.7. Resumen energías renovables	192
6.3. El vehículo eléctrico.....	194
6.4. Producción acumulada de tecnologías bajas en carbono... ..	195

6.5. Materiales para las tecnologías bajas en carbono	197
6.6. Flujos exergéticos de los escenarios para la transición energética.....	204
6.7. Límites minerales de la transición energética	211
7. El coste oculto de las tecnologías.....	217
7.1. Rareza termodinámica de aparatos eléctricos y electrónicos	218
7.2. Rareza termodinámica del vehículo	222
7.3. La pérdida de riqueza mineral asociada al vehículo	229
8. Mirando hacia el futuro	237
8.1. Sustitución de elementos.....	237
8.1.1. Vehículo eléctrico	239
8.1.2. Energías renovables.....	240
8.1.3. Placas de circuito impreso.....	241
8.1.4. Iluminación.....	242
8.2. La economía circular o espiral	244
8.3. El reciclado	246
8.4. La imposibilidad termodinámica de cerrar los ciclos	252
8.4.1. Recuperación de metales valiosos en el vehículo ...	255
8.5. Medidas de ecodiseño.....	258
8.5.1. Medidas de ecodiseño en el vehículo	260
8.6. Fuentes alternativas dentro de la Tierra: la minería urbana	266
8.7. Fuentes alternativas fuera de la Tierra: la minería de asteroides	271
9. Epílogo. Reorientando la ciencia y la tecnología por un humanismo que contemple el futuro del planeta	277
9.1. Reorientando la ciencia y la tecnología de los materiales ..	277
9.1.1. Los materiales, una responsabilidad global.	277
9.1.2. ¿Hay soluciones tecnológicas?	278
9.2. Por un nuevo humanismo	280
9.2.1. Una visión rápida del estado del planeta en el siglo XXI	280
9.2.2. Thanatia y el comportamiento exponencial.....	282
9.2.3. ¿Adolescentes o maduros?	283
9.2.4. Thanatia y la visión en retroproyección del futuro.	284
9.2.5. La necesidad de un Plan estratégico para el Planeta.	286
9.2.6. Por un nuevo humanismo	288
Bibliografía	291
Glosario	307
Anexo 1. Composición de la atmósfera e hidrosfera de Thanatia....	311
Anexo 2. Composición mineralógica de la corteza continental crepuscular (Valero y Valero, 2014a)	315

*Este libro se terminó de imprimir
en los talleres del Servicio de Publicaciones
de la Universidad de Zaragoza
en septiembre de 2021*





La Tierra se ha convertido en una enorme mina; año tras año está aumentando la cantidad, y variedad, de recursos minerales que se extraen. Todas las tecnologías, desde los vehículos eléctricos hasta los equipos electrónicos, requieren grandes cantidades de materias primas, algunas de ellas muy escasas. En un planeta con recursos limitados, ¿habrá suficiente para satisfacer la demanda de la población mundial? ¿Cuáles serán las consecuencias de este consumo desmesurado de los recursos? El presente libro brinda a los lectores una comprensión profunda del agotamiento de los minerales a través de la geología, la minería, la metalurgia y la termodinámica.



ALICIA VALERO

Profesora de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Zaragoza. Directora del grupo de Ecología Industrial en el Instituto CIRCE y autora de más de cien publicaciones relacionadas con la degradación exergética de los recursos minerales del planeta. Forma parte de varios comités de expertos internacionales sobre materias primas críticas para la transición energética.

ANTONIO VALERO

Catedrático en Ingeniería Energética de la Universidad de Zaragoza, miembro del Club de Roma Internacional. Director del Instituto Mixto CIRCE y creador de la Fundación CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos). Medalla de Oro en Termodinámica de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME). Profesor honorario de la Universidad de Pekín (NCEPU). Ha dirigido 40 tesis doctorales.

GUIOMAR CALVO

Licenciada en Geología, doctora en Energías Renovables y Eficiencia energética. Cuenta con una amplia experiencia en la materia, proporcionando el contrapunto necesario al combinar la ingeniería con la geología. Es coautora de numerosas publicaciones científicas en revistas internacionales sobre el agotamiento de los recursos minerales desde un punto de vista termodinámico.