

Límites a la disponibilidad de minerales

Diciembre de 2014

¿Hay suficientes recursos energéticos y minerales para mantener un crecimiento ilimitado?

Alicia Valero, investigadora del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, CIRCE.

Revista El Ecologista nº 83

¿Es posible un crecimiento continuo con los minerales y recursos energéticos disponibles?
¿Permitirá el ingenio humano a través del desarrollo tecnológico compensar cualquier problema actual o futuro relacionado con la escasez de minerales? La autora ha investigado durante años para tratar de dar respuesta a estas relevantes cuestiones.

Han pasado más de 40 años desde la publicación del Informe al Club de Roma Los límites del crecimiento. Como es bien conocido, el libro de Meadows et al. (1972) alertaba sobre el colapso al que se enfrentaría la humanidad si se continuaba con el ritmo exponencial en el consumo desmesurado de recursos [1]. Los mensajes del Club de Roma generaron una gran controversia, creando dos corrientes de pensamiento: los tecno-optimistas, aquellos que consideraban que los recursos de la Tierra son ilimitados y que la tecnología facilitaría en cualquier momento su extracción; y aquellos que abogaban por una mejor gestión de los recursos finitos del planeta para evitar el colapso. ¿Pero qué ha ocurrido desde entonces?

Lejos de colapsar, el mundo (especialmente el desarrollado) ha estado gobernado por un optimismo económico sin precedentes. La ciencia y la tecnología han realizado avances prodigiosos en multitud de campos, entre ellos en la salud, alimentación, pero también en las nuevas tecnologías de la información o las energías alternativas. El crecimiento y florecimiento de las economías de muchos países parecían pues dar la razón a los tecno-optimistas.

Pero entonces llegó la crisis, la peor conocida desde el crac de Wall Street en 1929 y en la que seguimos sumidos desde 2008. Las bases en las que se asentaba ese optimismo han comenzado a tambalearse y se ha empezado a cuestionar seriamente si las predicciones de Meadows et al. (aunque prematuras) fueran ciertas.

Thanatia, la tierra crepuscular

Esta ha sido en parte la motivación de la investigación llevada a cabo por mi grupo en CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos). Durante más de diez años me he dedicado a buscar y rebuscar información que de una manera objetiva, permita evaluar el estado de los recursos minerales del planeta. No se trata de emitir juicios de valor y posicionarse en un bando u otro, sino el de proporcionar datos que arrojen luz al debate.

En agosto de 2014 mi coautor Antonio Valero y yo publicamos el libro *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources* [2]. En él proponemos Thanatia en contraposición a la Gaia de Lovelock, como un planeta comercialmente muerto, en donde el ser humano ha extraído todos sus recursos minerales y los ha dispersado al tiempo que ha consumido todos los combustibles fósiles. Este planeta, del cual creamos un modelo termodinámico para su atmósfera, hidrosfera y corteza terrestre, sirve para postular un posible final del Antropoceno, puesto que conocer el final y la velocidad a la que nos aproximamos a dicho fin permite adquirir sentido del sentido y proporcionar evidencias para frenar la degradación. El modelo de tierra crepuscular, o Thanatia, sirve además como punto de partida para evaluar a través del concepto de costes de reposición, la riqueza mineral del planeta. Se trata de un enfoque desde la tumba hasta la cuna, en donde calculamos la energía necesaria para reponer los minerales que se han dispersado en Thanatia, hasta las condiciones en las que se encontraron en la naturaleza.

Con el modelo de Thanatia e información que hemos ido recopilando para nuestro libro, podemos pues abordar algunas cuestiones clarificadoras para desmitificar algunas de las tesis sostenidas por los tecno-optimistas. Éstas son:

1. ¿Hay suficientes recursos energéticos y minerales para mantener un crecimiento ilimitado?
2. ¿Permitirá el ingenio humano a través del desarrollo tecnológico compensar cualquier problema actual o futuro relacionado con la escasez de minerales?
3. ¿Puede absorber Gaia todos los impactos asociados con el desarrollo del ser humano?

Consumo de materiales



Antes de abordar dichas cuestiones, es conveniente analizar la evolución en el consumo de minerales a lo largo de la historia y las tendencias presentes y futuras. En las figuras 1 y 2 se puede observar la clara tendencia exponencial que ha seguido la producción de los minerales energéticos y no energéticos a lo largo de la historia hasta nuestros días. Desde 1950, el consumo de combustibles fósiles (en términos energéticos) se ha multiplicado por cinco y el de minerales no energéticos por siete. De acuerdo con datos del US Geological Survey (USGS), la demanda global de minerales superó en el año 2011 los 45.000 millones de toneladas, siendo los combustibles fósiles, materiales de construcción, las sales y los metales como el hierro, aluminio, cobre, manganeso, cinc, cromo, plomo, titanio y níquel, los más consumidos.

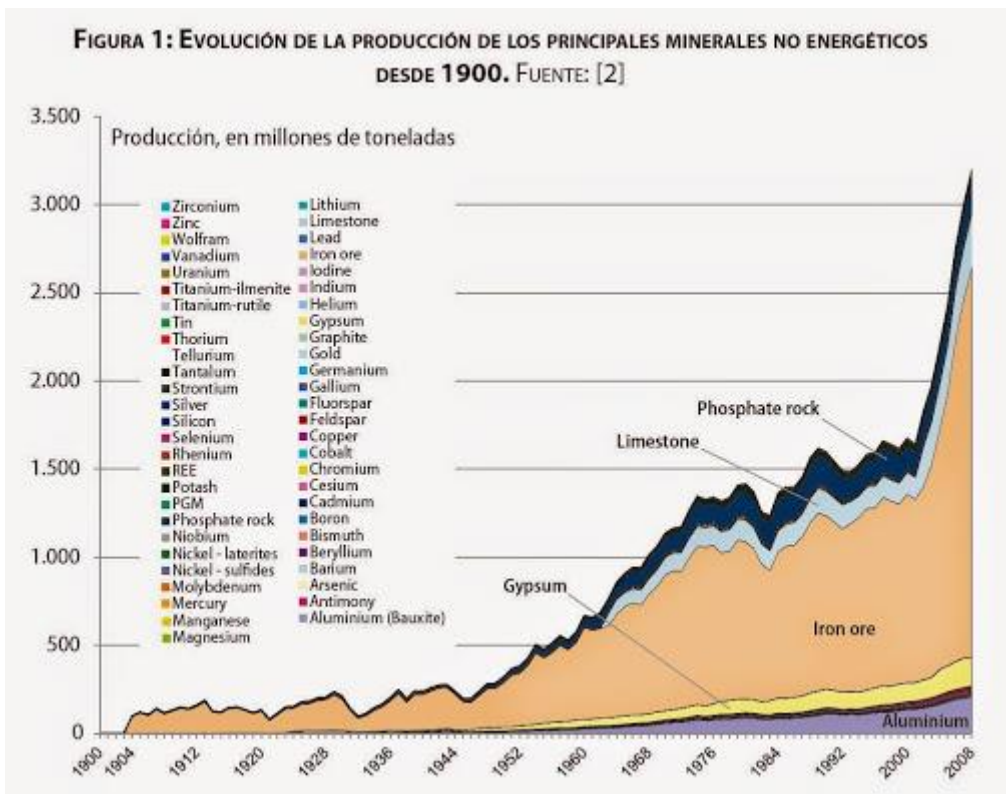


Figura 1: Evolución de la producción de los principales minerales no energéticos desde 1900. Fuente: [2].

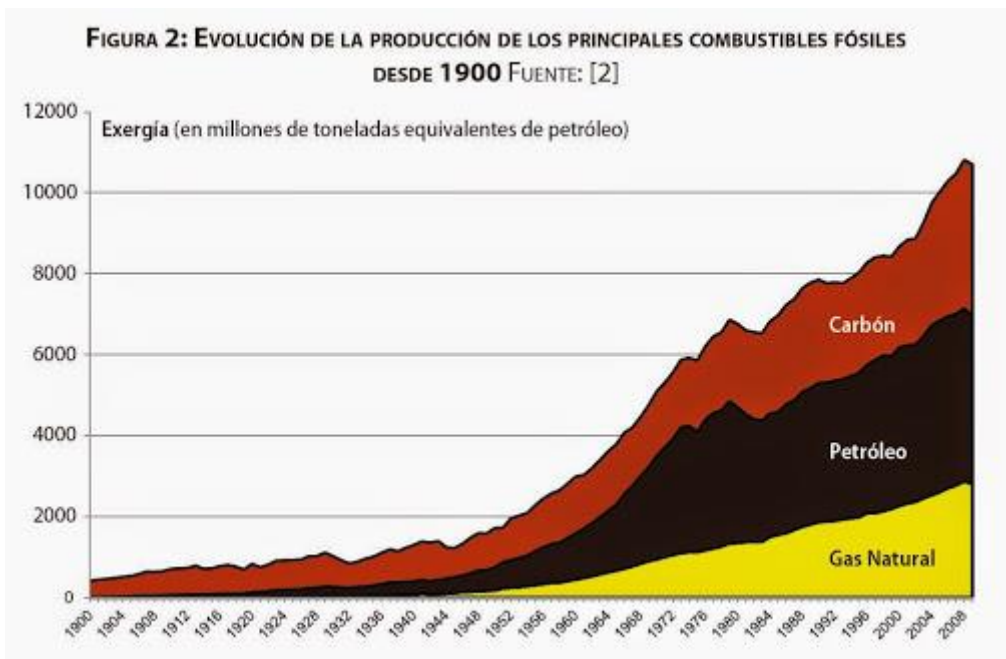


Figura 2: Evolución de la producción de los principales combustibles fósiles desde 1900, expresados en kilotoneladas de petróleo equivalente. Fuente: [2].

Hoy en día el ser humano hace uso de prácticamente todos los elementos de la tabla periódica. El auge de las nuevas tecnologías y las energías renovables han multiplicado el consumo de muchos minerales, algunos de los cuales se consideran críticos en cuanto a riesgos en su disponibilidad (de carácter geopolítico o ambiental). Así por ejemplo, el indio, utilizado en pantallas planas y en los nuevos paneles fotovoltaicos basados en la tecnología más eficiente CIGS, se extrae

de los barros residuales del refinado electrolítico de cobre y zinc. Para producir un gigavatio fotovoltaico con esta tecnología se necesitan de 25 a 50 megatoneladas de indio que procede en gran medida de China. Y sin embargo en 2013, la producción ni siquiera alcanzó la megatonelada según el USGS (770 t). La demanda mundial de este elemento se espera que aumente más de 8 veces de aquí a 2030 y la de galio, otro de los elementos incluido en las CIGS, por 22 [3]. A problemas similares se enfrentan otros minerales incluyendo las tierras raras como el neodimio o disprosio, esenciales en la producción de imanes permanentes en aerogeneradores o en el motor eléctrico y cuyo mercado está controlado casi al 100% por China.

En cuanto a lo que ocurrirá en el futuro, Halada et al. [4], realizaron una proyección sobre el consumo de minerales basado en un modelo de desacoplamiento lineal en donde se relacionaba el consumo de metales per cápita y el PIB para los países ricos (G6) y emergentes (BRICS). El resultado fue que para el año 2050 se espera que el consumo de metales quintuple globalmente el actual y que la demanda de algunos de ellos como el oro, plata, cobre, níquel, estaño, cinc, plomo o antimonio será superior a sus reservas actuales.

Las leyes termodinámicas en acción

Conocidos algunos de los hechos, vamos ahora a tratar de dar respuesta a las preguntas planteadas arriba. Para ello, es importante apoyarnos en las leyes físicas que gobiernan a la Naturaleza: las leyes termodinámicas. Su primer principio, el de la conservación de la energía, establece que “la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma”. Equivalentemente, la ley de la conservación de la materia puede postularse como “la materia ni se crea ni se destruye y solo en algunas excepciones radioactivas puede transformarse”. El segundo principio, o la ley de la entropía, va más allá imponiendo la dirección de la transformación. Así, de acuerdo con este principio, todo proceso natural o artificial evoluciona espontáneamente hasta la degradación. Partiendo de esta base se puede llegar a varias conclusiones.

Los recursos energéticos de la Tierra, teniendo en cuenta su mayor fuente, el Sol, son ciertamente ilimitados desde el punto de vista del ser humano. La energía solar y sus derivadas renovables como el viento, siempre estarán disponibles en tanto en cuanto exista la tecnología necesaria para su aprovechamiento y el Sol siga radiando todos los días. Esta afirmación no es válida para los combustibles fósiles, que sí son finitos. Una vez quemados se transforman irreversiblemente en CO₂ y agua, imposibilitando su reutilización para el mismo fin.

El caso de los minerales no energéticos es algo distinto. En primer lugar la dotación mineral del Planeta (con la salvedad de la llegada muy ocasional de meteoritos) es constante. Así que el ser humano debe desarrollarse con los minerales de los que dispone. Teóricamente estos son muy abundantes, puesto que toda la corteza terrestre está compuesta de minerales. A ello hay que sumar que al contrario que ocurre con los combustibles fósiles, la materia no se pierde una vez utilizada, solo se dispersa. Así que teóricamente, si dispusiésemos de energía suficiente, los materiales podrían emplearse cíclicamente infinitas veces.

De acuerdo con las tesis arriba descritas, aparentemente la Tierra puede proveer de recursos energéticos y minerales suficientes para un crecimiento ilimitado. Sin embargo hay que seguir investigando en el problema.

Para poder hacer uso de la energía del Sol, es necesario utilizar tecnologías (como paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, etc.) que necesitan una serie de minerales, muchos de los cuales son escasos en la corteza terrestre. Por lo tanto, aunque la energía del Sol es ilimitada, la capacidad del ser humano para extraerla sí es limitada. Es decir, no hay minerales sin energía, pero igualmente no hay energía sin minerales.

Por otra parte, a pesar de que toda la corteza terrestre esté compuesta de minerales, el hombre solo puede hacer uso de aquellos que están concentrados, ya que el coste energético (y por supuesto económico) de extraer de la roca desnuda es inabordable. Según nuestros estudios, los minerales concentrados tan solo representan entre un 0,01 y un 0,001% de la cantidad total de la corteza. Una mina es ciertamente una rareza geológica y a lo largo de la historia, las mejores minas, aquéllas con mayores leyes minerales, ya han sido explotadas. La figura 3 muestra un gráfico de un colega australiano, el Dr. Gavin Mudd, en donde se refleja cómo han ido disminuyendo a lo largo de la historia las leyes minerales de varios metales en su país [5]. La concentración de cobre por ejemplo, pasó en 50 años del 25% en 1950 al 1% (la media mundial está actualmente en torno al 0,5%). Es decir, que para extraer una tonelada de cobre, se necesita remover una media de 200 toneladas de roca.

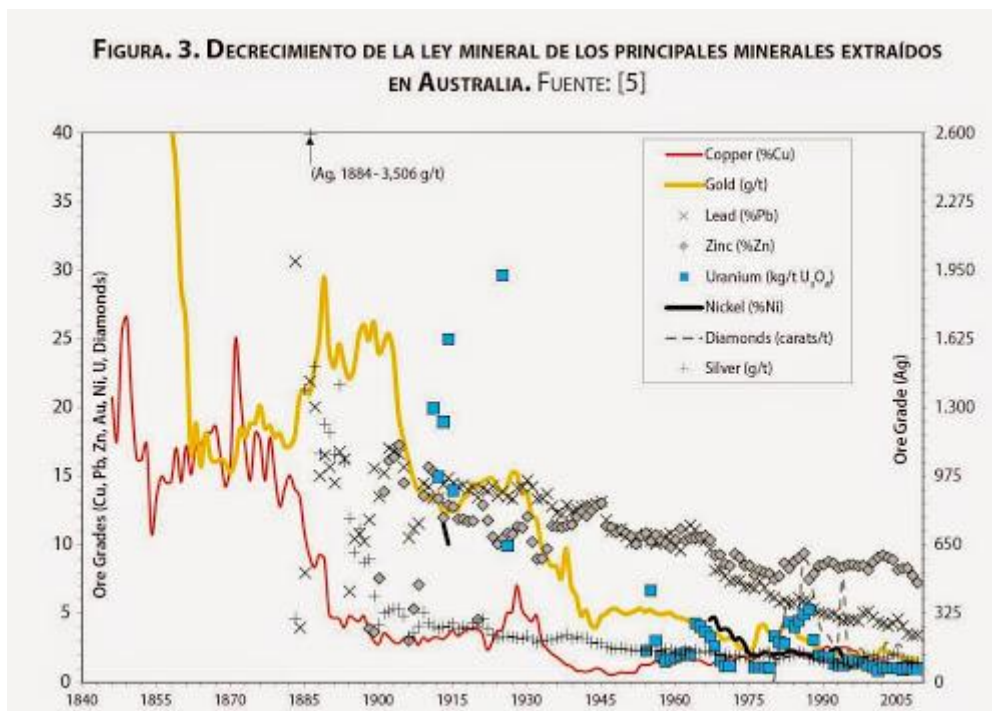


Fig. 3. Decrecimiento de la ley mineral de los principales minerales extraídos en Australia. Fuente: [5]

Aquí es donde entra en juego el Segundo Principio de la Termodinámica, que establece que para extraer la siguiente tonelada de mineral, el consumo energético asociado y la cantidad de roca removida crecerán exponencialmente. Inmediatamente surge la segunda pregunta planteada arriba: ¿con la tecnología del futuro no podremos continuar extrayendo materiales de minas cada vez menos concentradas?

Tecnología versus baja concentración

En este momento nos enfrentamos a varios problemas. El primero está relacionado con la tecnología misma. En los últimos años se han realizado importantes desarrollos tecnológicos en la minería y la metalurgia que han permitido reducir el consumo energético y abrir minas cuya extracción no era rentable en el pasado. Sin embargo el consumo de energía, aunque tiende a disminuir con los adelantos tecnológicos, aumenta con la reducción de la concentración. Para analizar cuál de los dos efectos está desequilibrando la balanza, realizamos diversos estudios para el caso del oro a nivel mundial (por falta de datos no hemos podido ampliarlo a otros minerales). El resultado fue que si bien en algunos casos el consumo energético había disminuido, en general podía afirmarse que globalmente estaba aumentando ya que el factor dominante era la disminución de las leyes de mina. Este resultado es previsible que se repita en otros minerales, puesto que mientras las curvas de aprendizaje reducen los consumos energéticos aritméticamente, la disminución de la concentración los aumenta de forma geométrica.

El segundo problema y no menos importante es que además de la energía, los impactos ambientales (y sociales) asociados a la extracción de minas menos concentradas aumentan también exponencialmente. Entramos pues a abordar la tercera de las cuestiones planteadas. Así, al aumento en las emisiones de CO₂ y SO₂ entre otros y el uso de agua, hay que sumar el impacto paisajístico que se provoca. Existe pues una clara conexión entre energía, minerales y medio ambiente. Ciertamente, en una mina a cielo abierto, excavar a una profundidad de "r", implicaría hacer un "agujero" cónico en la corteza de dimensiones de $\frac{1}{3}\pi r^3$. Semejante destrozo en la Naturaleza es intolerable para muchos países desarrollados. A esta reacción se le llama el efecto Nimby (not in my backyard, no en mi patio trasero). Las alternativas de extracción minera van reduciéndose y no quedará más remedio que explotar los polos, las selvas vírgenes o el fondo de los océanos. Por lo tanto los depósitos minerales van desplazándose a lugares más remotos, a mayor profundidad y con unos requerimientos energéticos y ambientales al alza. Irónicamente, el lema olímpico "Citius, Altius, Fortius" (más lejos, más alto y más fuerte) bien podría aplicarse a la minería "Más lejos, más profundo y más fuerte".

Una alternativa a la extracción es aumentar el reciclado, incrementando así los ciclos del uso de los materiales. Pero de nuevo nos encontramos ante dificultades. En la actualidad, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, UNEP [6], las tasas de reciclado de gran parte de los elementos de la tabla periódica es inferior al 1%. Tan solo unos cuantos, como el plomo, rutenio o niobio superan el 50%. Menos de la mitad del aluminio o el hierro consumido se recicla y menos del 25% de cobre. Para el caso del aluminio, emplear fuentes secundarias implica reducir el consumo energético en el 95%, lo que denota la enorme importancia en el ahorro de recursos. Sin embargo si el consumo de este metal continúa aumentando exponencialmente al ritmo del 2% anual, ni siquiera un reciclaje del 100% podría satisfacer la demanda. El resultado es que la extracción lejos de pararse se duplicaría cada 35 años.

Lo más preocupante de todo es que al contrario que el aluminio, muchos metales son extremadamente difíciles de reciclar ya que se encuentran mezclados con otros en cantidades ínfimas dentro de tablets, smart-phones, y demás equipos

eléctricos y electrónicos. La dispersión geográfica de estos artefactos y las pequeñas concentraciones (del orden de mili y microgramos) en las que se encuentran muchos metales, provocan que sea más fácil seguir extrayéndolos de la naturaleza que hacer un esfuerzo de reciclado. Y sin embargo, la concentración de oro en la basura electrónica es probablemente mayor que la de la corteza terrestre.

La sustitución tecnológica entre elementos puede aportar un balón de oxígeno a determinados recursos con problemas de escasez. Un caso típico es la sustitución del cobre por el aluminio como conductor de la electricidad. A pesar de ello, la sustituibilidad de materiales, al contrario que la energética, es limitada y muy específica para cada caso, variando desde viable (caso del cobre por aluminio) a imposible, como en el caso del fósforo, que es un elemento vital para la alimentación y la producción de biocombustibles. Precisamente por este hecho, el fósforo es probablemente uno de los elementos más críticos.

El resultado de todo lo descrito es que Gaia inexorablemente está transformándose en un planeta sin recursos, Thanatia. Esta evolución, que es consecuencia del segundo principio de la Termodinámica, está acelerándose de forma preocupante por la acción humana. Un planeta de recursos limitados no puede soportar los deseos crecientes de una población que no hace más que aumentar y que lleva ritmo de alcanzar los 10.000 millones de individuos en 2050. Crecimiento no es sinónimo de prosperidad.

En este futuro que ya es presente, la tecnología constituirá un factor importante que como hemos visto puede incluso acelerar la degradación. Sin embargo, utilizada de forma inteligente, la tecnología también será necesaria para buscar alternativas limpias y eficientes al uso de los recursos. Una gestión eficiente de los recursos requiere de "Tecnología y Ética", es decir, "Eficiencia y Suficiencia". Esta es la clave para frenar la degradación hacia Thanatia.

Notas

[1] Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J. & Behrens, W. W. The Limits to Growth Universe Books, 1972.

[2] Valero, A. & Valero D., A. Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources World Scientific Publishing, 2014.: <https://www.youtube.com/watch?v=M6qi4bKRPe0>

[3] Tercero-Espinoza, L.; Gandenberger, C. & Marscheider-Weidemann, F. Critical raw materials and the EU. Fifth Intl.Conf. on Sustainable Development in the Minerals Industry, SDIMI, 2011, 737-745.

[4] Halada, K.; Shimada, M. & Ijima, K. Forecasting of the Consumption of Metals up to 2050. Materials Transaction, 2008, 49, 402-410.

[5] Mudd, G. M. The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. Resources Policy, 2010, 35, 98-115.

[6] Graedel, T.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B.; Sibley, S.; Sonnemann, G.; Buchert, M. & Hagelüken, C. Recycling Rates of Metals - A Status Report UNEP, 2011.