

Pandora y Thanatia: una visión termodinámica del agotamiento de los recursos minerales

Pandora and Thanatia: a thermodynamic vision of the mineral resource depletion

Luis Gabriel Carmona*
Kai Whiting**

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2014

Aceptación: 27 de noviembre de 2014

Recibido versión final: 1 de diciembre de 2014

Resumen

Los recursos minerales son cada vez más escasos. Este fenómeno obedece a la intensa presión ejercida por la industria minera y a los hábitos de consumo humano. Mediante la herramienta del análisis exergético es posible valorar este grado de agotamiento; sin embargo, el “lenguaje” de la termodinámica no es transferido fácilmente desde la ingeniería hacia otras esferas tales como la administración y las políticas públicas. La presente reflexión del agotamiento de recursos ha sido ilustrada de forma didáctica para que el público en general pueda entender su criticidad. Tomando como ejemplo dos cuerpos celestes: Pandora de la película Avatar de James Cameron y la hipótesis de la tierra crepuscular de Thanatia, los autores explican la exergía, el ambiente de referencia e instrumentos para la gestión de recursos. Finalmente se señala la necesidad de un mayor nivel de concientización sobre la importancia en la toma de decisiones hacia el desarrollo sostenible y la protección del patrimonio geológico.

Palabras clave

Exergía, planeta crepuscular, costo exergético de reposición, ambiente de referencia.

Abstract

Mineral resources are becoming increasingly exhausted. This phenomenon is due to a combination of the pressures exercised by the mining industry and the habits of human consumption. Through the thermodynamic tools of the exergy analysis it is possible to value this exhaustion. However, the “language” of exergy and thermodynamics does not always facilitate information transfers away from

* Ingeniero Ambiental y Sanitario, MSc. Eficiencia Energética y Ecología Industrial. Docente – Investigador. Programa de Administración Ambiental, Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Piloto de Colombia. Nacionalidad: colombiana. Correo electrónico: luis-carmona@unipiloto.edu.co, lugacapa@gmail.com.

** Profesional Medio Ambiente y Tecnología, MSc. Negocios y Medio Ambiente, MSc. Energías Renovables, Director de Programa Ingeniería en Energías, Facultad de Ingeniería Universidad EAN. Nacionalidad: Británico. Correo electrónico: kewhiting@ean.edu.co, whitingke@yahoo.co.uk

engineering and into the spheres of business and public policies. This paper is a reflection of resource depletion written in a didactic way so that all individuals can understand its criticality. Borrowing from two celestial bodies: Pandora of James Cameron's *Avatar* and the hypothetical crepuscular planet Thanatia, the authors explain exergy, the reference environment and the tools involved in resource management. The paper also states the need for a greater level of awareness in the taking of decisions that support both sustainable development and the protection of geological heritage.

Keywords

Exergy, crepuscular planet, reposition exergetic cost, reference environment.

Introducción

Este artículo presenta una reflexión acerca de la relación que existe entre los recursos minerales y la exergía, haciendo uso de una metáfora en la que se compara a la tierra con dos cuerpos celestes imaginarios, los cuales fueron dados a conocer al mundo en el año 2009. Estos últimos se asemejan al planeta tierra en el que vivimos y ambos están afectados por las acciones de sus habitantes debido a su deseo absoluto de extraer recursos minerales a cualquier precio. El primero es una luna con el nombre de *Pandora*, ubicada a unos seis años luz de distancia de la tierra, al que se puede ir con la tecnología desarrollada para el siglo XXII y constituye el tema central de la película *Avatar* del director James Cameron. Su nombre se origina del mito griego, representando la esperanza para la humanidad que para esa época había agotado la mayoría de sus recursos. El otro es un planeta crepuscular llamado *Thanatia* (Valero et al. 2009), nombre calificativo que se deriva del griego cuyo significado corresponde a la muerte sin violencia. Este planeta imaginario simboliza a la tierra en un escenario en donde no existen actividades comerciales, pero esto no significa que el planeta haya llegado a su fin *per se*. En términos termodinámicos, Thanatia es un ambiente de referencia y se aplica especialmente para evaluar la riqueza mineral y su agotamiento debido a las actividades de la sociedad. La corteza de este planeta no contiene minas explotables desde una perspectiva productiva, considerando que todos los minerales, tanto energéticos como

no energéticos, han sido extraídos. De hecho, en Thanatia dichos recursos ya fueron dispersados y degradados hasta el punto en que la composición del lecho rocoso ha alcanzado su homogeneidad y todos los combustibles fósiles existentes han sido quemados.

Si bien las características de Thanatia no se refieren exactamente a las del planeta de donde son originarios el ex-marino Jake Sully y la Dra. Grace Augustine (protagonistas de la película *Avatar*), tal vez se asemejan lo suficiente al estado de deterioro de dicho planeta. De acuerdo con el argumento de esta producción cinematográfica, la escasez existente para el año 2154 motiva a la *Administración para el Desarrollo de Recursos* (ADR) a llegar a la lejana luna de Pandora y empezar su misión peligrosa y compleja de saquear los recursos naturales. Este objetivo incluso considera el desplazamiento forzado de los humanoides sapiens de piel azul, los *Na'vi*, a costa de las desmedidas pérdidas sociales, ambientales y espirituales. En particular, la ADR tiene interés en el hogar de la tribu *Omaticaya* (el Árbol-Casa) por el hecho de ser un lugar donde se encuentra emplazado uno de los depósitos minerales más ricos. Todos los sacrificios ocurren en el nombre *unobtainium* o lo que se puede traducir como "imposible-conseguir-en-sustancia", un nuevo dios del homo sapiens.

Volviendo a Thanatia (o Thánatos, Θάνατος), esta representación planetaria proporciona un ejemplo metafórico para científicos y políticos de nuestro siglo, por medio del cual es posible comprender cómo mediante la exergía y la Segunda Ley de la Termodinámica es posible a evaluar los recursos

minerales, que la gran mayoría de la humanidad sacrifica para construir y mantener sus civilizaciones.

A partir de la comparación imaginaria entre Pandora, Thanatia y el planeta tierra, los autores pretenden mostrar si la exergía y el análisis exergético pueden ser utilizados como una medida del agotamiento de los recursos minerales. Además, se quiere indagar si es posible brindar una herramienta a Colombia para mejorar los métodos de gestión del sector extractivo. Un punto a evaluar son las implicaciones de la adopción de un marco de análisis termodinámico (en este caso la exergía) a casos normalmente no evaluados desde perspectivas no termodinámicas, por ejemplo, la escasez mineral.

El análisis exergético no es un fenómeno nuevo, aunque su uso no había sido extendido y aplicado con frecuencia. A nivel industrial se usa muy a menudo, siendo restringido a los cálculos realizados por ingenieros “secos”. Para los autores, una de las razones para abordar este artículo obedece a que el término y sus aplicaciones se deben integrar cada vez más en los problemas ecológicos, sociales y económicos, como una de las formas de promover el desarrollo sostenible en el siglo XXI.

La escasez de recursos

En los últimos siglos, el mundo ha sido testigo de un crecimiento sin igual de la población humana. Este aumento se ha alimentado de un consumo sin precedentes y ha causado numerosos impactos ambientales nocivos, incluyendo la conversión de una gran proporción de la naturaleza para el uso humano. Estas alteraciones han aumentado las preocupaciones y se han generado preguntas sobre la suficiencia de la riqueza de los recursos naturales actuales, tanto renovables como no renovables, para sostener el desarrollo de la sociedad moderna.

Kooroshy et al. (2009) resaltan el hecho de que la producción minera global se ha multiplicado más de cinco veces entre 1950 y 2000, con un fuerte engrandecimiento de la elaboración de metales y agentes dopantes en la primera década del siglo XXI. Se debe preguntar si este nivel de crecimiento, que se está cristalizando en “un problema de los más complejos y urgentes en el mundo de hoy” (WFF 2011, 02), es realmente sostenible.

Para comprender el verdadero dilema de la escasez de los recursos, primero es importante resaltar que la corteza de la tierra no presenta una insuficiencia de elementos *per se* (Kesler 2010). De hecho, las restricciones se dan en los depósitos concentrados explotables desde la perspectiva económica y ambiental. Tales depósitos minerales sólo constituyen entre un 0,01% y 0,0001% de la masa de la corteza y es por esta razón que Valero y Valero (2014) aseveran que “la escasez mineral no se debe contemplar solo desde la perspectiva Maltusiana sino que debería vincularse con la ley de rendimientos decrecientes”. Adicionalmente, como la materia de mejor calidad (la que se ubica más cerca a la superficie) ya ha sido extraída, lo que aún resta requiere de un aumento en el uso de maquinaria pesada, lo cual es incluso ineficiente. Tales equipos consumen grandes cantidades de energía y remueven colosales volúmenes de roca, suelo y sub-suelo, deterioran el entorno y afectan a las comunidades vulnerables. Esto es algo que ha venido ocurriendo en el caso de las poblaciones indígenas y afro descendientes del Chocó colombiano.

Distintas personas en los ámbitos políticos y científicos comparten todavía un sentido del optimismo, pese a las alarmas encendidas por Malthus ya en el siglo XVIII y al hecho de que una escasez geológica real existe, en términos de la dificultad para encontrar depósitos suficientes para el desarrollo moderno. Para tales grupos de personas persiste la idea de que los avances tecnológicos “salvarán el mundo” o que las otras formas de capital pueden sustituir completamente al capital natural (Neumayer 2000).

Sin embargo, al mirar los precios de los minerales energéticos y no energéticos, es obvio que el valor dado por los mercados internacionales no refleja la implicación de su agotamiento. Adicionalmente, el problema de la valoración de recursos no es nada fácil. Los autores de este artículo defienden la necesidad de una conexión más rigurosa entre los métodos económicos y el conocimiento físico de los recursos, incluyendo los impactos asociados con la extracción y pérdida de riqueza mineral.

Estos dos aspectos de valoración: el mercado y el que requiere de un entendimiento físico de la corteza planetaria (y la biosfera en general), necesitan ser componentes complementarios que generen resultados

de interés a gran escala. Igualmente deben resolver las contradicciones entre los objetivos parciales de corto plazo del mundo corporativo respecto a los de largo plazo, con un alcance mucho más amplio. Estos deben exigir el mantenimiento de los procesos productivos y una gestión adecuada del medio ambiente para su conservación (Naredo y Parra 1993).

Esta visión de tomar en cuenta el largo plazo, obliga a la recopilación de información sobre las cantidades y las características de los recursos físicos y la creación de modelos e inventarios. Tales deben ser diseñados y aplicados desde la perspectiva lógica para considerar de una manera cuantitativa los procesos físicos reales involucrados en la formación de un depósito mineral específico y su extracción. También implica una participación comunitaria para averiguar los impactos ambientales y socioeconómicos asociados con la actividad del sector minero. Y es aquí donde la propiedad de la *exergía* y el concepto de los costes exergéticos cumplen su papel, tal como los autores explican a continuación.

Una introducción a la exergía

La energía, la exergía y la entropía son tres conceptos ampliamente interrelacionados. La exergía mide la eficacia o el valor real de la energía (Rosen y Dincer 1997). Aunque la energía y la exergía no son iguales, ambas se expresan en las mismas unidades energéticas de Julios, es decir, Vatios por segundo (W.s). Se podría decir que desde el punto de vista físico, la energía siempre se conserva, mientras que la exergía siempre se destruye, a menos que los procesos sean completamente reversibles. La principal razón obedece a que el consumo de la exergía necesariamente genera entropía, de manera proporcional a la fracción destruida.

La exergía está compuesta por sus fracciones térmica, mecánica y química, las cuales están determinadas por los gradientes de temperatura, presión y potencial químico, respectivamente; y por ende, define exactamente lo que es consumido en cualquier sistema. La energía de alto valor, incluyendo la solar que ingresa a la tierra, la electricidad y el trabajo eléctrico o mecánico son ejemplos de exergía pura. En todo caso, una vez que la calidad de esta energía se reduce, es la exergía y no la energía la que es destruida. Sin embargo, es esta energía útil (la

exergía) la que juega un rol muy importante en la sociedad y la naturaleza.

La exergía no es únicamente una propiedad termodinámica sino una co-propiedad construida por dos partes: un sistema y un ambiente de referencia. Si un sistema está en equilibrio absoluto con su entorno circundante, no existen diferencias entre las propiedades del sistema y la exergía es igual a cero. Una vez que se registra una desviación, el sistema contendrá exergía en la misma medida en que se aleja de su ambiente de referencia. Una representación de esto es el hecho de que el agua hervida tiene más exergía en el nevado de Santa Isabel (4.965 msnm) que en un día caluroso en la bahía de Cartagena; mientras que un bloque de hielo no tendrá mucha exergía en este pico congelado pero sí mucha en este paradisíaco lugar cerca a la playa.

Resulta válido considerar, por ejemplo, que Pandora estaría llena de recursos exergéticos dado que los *Na'vi* respetan su tierra, tomando de ella solo cuando es estrictamente necesario y reconociendo que toda la energía es prestada. Por su parte, los termodinámicos trabajan según el mismo principio que los *Na'vi*.

De acuerdo con Calvo (2012), la exergía de un recurso mineral se evalúa en términos de la composición mineralógica, el grado de concentración y la cantidad disponible en la mina. Un depósito mineral será distinto de su entorno, donde las concentraciones de minerales serán evidentemente mucho más bajas. Por lo tanto, cierto mineral poseerá exergía y entre mayor sea su concentración, tendrá más exergía que uno con un bajo grado. Este fenómeno también explica por qué un mineral de menor concentración puede ser extraído pero a un costo mayor o una pérdida más grande de exergía. Una vez que un elemento se extrae de una mina, las concentraciones de ésta última empiezan a reflejar un parecido con el lecho de roca estándar y la tierra experimenta una caída significativa de exergía.

Una contribución muy importante de la exergía como una unidad de medida, es la posibilidad de poderla involucrar en un análisis cuantitativo de largo plazo. No es posible decir lo mismo de los valores monetarios. La exergía frente al dinero también puede:

Demostrar el efecto de los desperdicios, la extracción minera, el consumo de agua o la erosión del suelo, lo cual se puede extrapolar para indicar los riesgos presentados a

la sociedad, y si éstos se están acelerando. La exergía al ser representada según el sistema internacional de medidas (kJ), igualmente puede ser utilizada para la cuantificación de energía y de la materia (Valero y Valero 2014, 517).

La valoración exergética

El costo de reposición exergética es la cantidad de exergía requerida, dadas las restricciones tecnológicas actuales, para devolver a cierto recurso abiótico sus condiciones físico-químicas originales, como estuvieron presentes inicialmente en la naturaleza. Adicionalmente, puede llegar a estimar el nivel de sostenibilidad de un proceso, producto o actividad, precisamente por dar una aproximación de los costos que la generación actual debe cargar para asegurar el buen funcionamiento de las futuras sociedades, en concordancia con el concepto de desarrollo sostenible (Brundtland 1987).

Dado que el consumo de los recursos naturales implica la destrucción de sistemas organizados y es la causa de la dispersión de la contaminación (que a su vez es la fuente de la entropía), el análisis exergético describe la degradación del capital natural (Valero et al. 2006). Para la riqueza mineral específicamente, la exergía asigna un valor relativo a un cierto mineral al diferenciar entre éste y el ambiente definido (es decir, el ambiente de referencia). Tal evaluación está compuesta por tres elementos (químico, concentración y conminución), de los cuales dos tienen la mayor relevancia para este artículo:

1. La exergía química (B_{cb}): representada por el mínimo trabajo teórico que se debe gastar para crear minerales con una composición específica en la corteza terrestre.
2. La exergía de concentración (B_c): representada por el mínimo trabajo teórico que se debe gastar para generar los depósitos minerales, habitualmente extraídos por la humanidad para su desarrollo.

El costo de reposición exergética, denotado por B^* , puede ser obtenido por sus homólogos exergéticos multiplicados por los factores k_{cb} y k_c , que son las unidades físicas y adimensionales de los costes de exergía químico y de concentración, respectivamente; tal como se muestra a continuación:

$$B^* = k_{cb} \times B_{cb} + k_c \times B_c \quad \{1\}$$

Donde:

- k_c representa los costos unitarios de reposición exergéticos necesarios para reconcentrar las sustancias desde un estado de dispersión a las condiciones iniciales. Se obtiene como la relación entre la exergía necesaria a ser consumida por el hombre respecto a la mínima utilizada por la naturaleza (B_c). Debe ser obtenido para cada mineral, asumiendo que la misma tecnología es aplicada para todos los rangos de concentración.
- k_{cb} es el costo unitario de reposición exergética para los procesos de refinamiento empleados por el hombre respecto a la mínima requerida por la naturaleza (B_{cb}).

El objetivo principal de este análisis es la identificación de las eficiencias y la magnitud de las pérdidas exergéticas (Dincer y Rosen 2007). Así, se puede medir tanto el avance de la innovación tecnológica y operativa, como el fomento del desarrollo sostenible debido a la interconexión entre la energía (exergía) y el ambiente.

Unas de las mayores desventajas en el uso de la exergía en cualquier forma de análisis, no solo para minerales, es el hecho de que esta medida aún no ha sido realmente entendida por el público en general. Incluso ni siquiera se ha usado con frecuencia por parte los administradores o los ingenieros, mucho menos por los legisladores, para la contabilidad y gestión de los recursos naturales. Otro inconveniente que tiene que ver con la aplicación de la exergía es la necesidad de seleccionar un ambiente de referencia adecuado. A pesar de estas dificultades e impedimentos en la comprensión del concepto, la noción de la exergía se basa en términos de calidad y cantidad de un grupo de sustancias.

Thanatia, el ambiente de referencia de la riqueza mineral

Cualquier ambiente de referencia se considera como infinito y en equilibrio, o el equivalente a un estado muerto. "En el estado muerto, un sistema tiene la misma temperatura y presión como el ambiente

de entorno (es decir que existe en equilibrio térmico y mecánico); no tiene energía potencial ni cinética relativa al ambiente (velocidad y elevación igual a cero) y no reacciona con el ambiente, es decir que es inerte químicamente” (Quattrochi y Luvall 2004, 303). Se considera “muerto” porque está asociado con la idea de un límite termodinámico. Ha perdido todo su exergía y como consecuencia, todo su potencial para hacer trabajo (Valero y Valero 2014). Por lo tanto, la exergía mide la diferencia entre un sistema dado y el mencionado estado de equilibrio (Dincer y Cengel 2001).

El cuerpo crepuscular de Thanatia, como se explicó en la introducción de este artículo, puede usarse como un ejemplo que simboliza específicamente la riqueza de la tierra y su pérdida por causa de las actividades humanas. Es una tierra teórica que representa “la muerte comercial” del planeta, en el que los recursos minerales se encuentran dispersos, y por lo cual no es viable sostener la economía en su estado actual. La exergía presente en Thanatia, medida a través de su representación cuantitativa del Modelo de la Tierra Crepuscular, inicialmente mencionado por Valero et al. (2009), da una indicación sobre la calidad de un recurso específico y constituye un objetivo global y una herramienta útil para la clasificación de capitales minerales según sus niveles de agotamiento.

El Modelo de la Tierra Crepuscular se compone de una atmósfera, una hidrósfera y una corteza continental, las cuales representan un sistema cerrado que ha alcanzado características de degradación, debido a procesos entrópicos. La última versión del Modelo de la Tierra Crepuscular creado por Valero y Valero (2014) se basa en los modelos y composiciones previamente estudiados por otros autores, como por ejemplo, el escenario de proyección de emisiones gases efecto invernadero de Höök et al. (2010), la composición del agua salada de Millero et al. (2008) y Quinby-Hunt y Turekian (1983) y la constitución de la corteza terrestre descrita por Grigor'ev (2000).

A diferencia de la tierra actual, la corteza de este planeta crepuscular no contiene minas explotables comerciales dado que todos los minerales no energéticos han sido extraídos, se encuentran dispersos y degradados y se ha alcanzado una composición uniforme del lecho de roca. Todos los combustibles fósiles han sido quemados. Como consecuencia, la

concentración del dióxido de carbono en la atmósfera es más alta que las condiciones actuales y se ha logrado el estado predicho por los modelos del cambio climático de largo plazo, donde los gases del efecto invernadero alcanzan una concentración de 683 ppm debido a la combustión completa de los minerales energéticos. Igualmente, toda el agua presente en la hidrósfera, excepto una porción de 2,5% “contenida” en el ciclo hidrológico, es salina, con una concentración estándar dada la mezcla de agua salada y dulce.

La tierra, tal como la conocemos, debido a la inevitabilidad de la Segunda Ley de la Termodinámica experimentará tarde o temprano las condiciones presentadas en Thanatia, el planeta crepuscular. Los costes exergéticos o energéticos pueden ser usados para estimar el nivel de degradación. Esto es porque la propiedad de la exergía y los costes exergéticos de reposición pueden indicar la energía útil requerida para restaurar los minerales que han sido extraídos, usados y dispersados en Thanatia a sus condiciones originales. El coste exergético de reposición es un término que se refiere al valor exergético adicional que la humanidad debe emplear para retornar desde las circunstancias desfavorables en que se encuentran los elementos en promedio del lecho de roca (es decir, Thanatia) a las condiciones de “bono” que la naturaleza da al hombre, que no es más que la energía gratuita que fue empleada para concentrar los depósitos minerales que actualmente son explotados.

Ahora bien, como se ha comentado en el presente artículo, el planeta Thanatia puede ser utilizado como un referente para valorar la riqueza mineral de un planeta, un país, una compañía, o un mineral específico, arrojando resultados reveladores sobre la gestión sostenible ejercida por la humanidad, haciendo uso de la Fórmula 1 (presentada anteriormente).

Aplicación del análisis exergético

De acuerdo con los cálculos realizados por Valero y Valero (2012), los costos de reposición exergética (bono) asociados a la producción de 37 minerales producidos a nivel mundial en 2008 es equivalente a 5,3 Gtep. Al comparar este valor con la producción de combustibles fósiles para ese mismo año se obtiene: petróleo 4,4 Gtep; carbón 3,3 Gtep y gas 2,8 Gtep (BP 2013). Es decir, para reponer los minerales

explotados en este mismo período, se requeriría al menos la mitad de la extracción de los productos energéticos no renovables realizada a nivel mundial.

De las anteriores cifras también se podría inferir que la valorización post consumo de los minerales puede ser una solución efectiva para minimizar el riesgo a futuro por agotamiento de estos recursos; sin embargo, asumiendo una tasa de reciclaje promedio mundial de 44% de los principales elementos metálicos (entre los que se encuentran el aluminio, hierro, estaño, cromo, plomo, titanio, cobre, níquel y zinc), de igual forma se experimenta una pérdida de la reserva mineral planetaria de alrededor de 3,8 Gtep. Esto último sin contar con la energía requerida para la minería, fundición y refinación de los elementos, la cual se encuentra por el orden de 1,5 Gtep (Valero y Valero 2014).

Para el caso de Colombia, el análisis realizado para evaluar el costo exergético de reposición por la producción mineral del año 2011, revela un equivalente aproximado de 2.295 ktep, considerando tan solo 6 compuestos – cobre, oro, hierro, caliza, níquel y plata –, algunos de los cuales se han señalado como minerales estratégicos dentro del *Plan Nacional de Desarrollo Minero, Visión 2019*. Frente al consumo de minerales energéticos que se encuentra por el orden de 119.182 ktep, llama la atención que la principal fuga se da por este último rubro y en las exportaciones. Por su parte, el total de esta variable desde 1990 corresponde a 41.460 ktep, lo que representa 12,7 veces la media del consumo de carbón del país. Al convertir la pérdida exergética del país en valores económicos, ésta puede llegar a representar entre USD \$51 y \$57 miles de millones al año, aproximadamente del 16% al 18% del Producto Interno Bruto (PIB) de 2011 (Carmona 2014). Si de igual forma se aplica una estrategia nacional para alcanzar una tasa de reciclaje promedio del 32% de los minerales evaluados, tan solo se obtendrían ahorros materiales por valor de USD \$0,08 a \$1,2 miles de millones. En todo caso, los valores mundiales y nacionales se verán incrementados en la medida en que se incluyan otros minerales en la evaluación.

Los valores más altos de bono exergético de concentración incluyen el oro, mercurio, cadmio, cobalto, plata, tántalo y wolframio (el bono exergético de estos elementos oscila entre 5.898 y 583.588 GJ/ton, según el mineral). Por su parte, los costos de

reposición exergética de los combustibles fósiles son considerados inmensurables por algunos autores (Botero 2000, Valero 2008), dada la dificultad de reproducir el proceso con el que fueron creados los recursos de forma tecnológica y económicamente racional y eficiente.

Para los autores de este artículo, el análisis exergético y su evaluación en términos monetarios son un instrumento que puede indicar de forma práctica y técnica la distorsión que existe entre los precios asignados en el mercado y el valor físico de los recursos naturales, incitando a una mayor y acelerada pérdida del patrimonio mineral. Además, mediante su uso se pueden obtener indicadores que sean de relevancia para diferentes grupos de interés (comunidades, gobierno, compañías), medibles físicamente, y comparables entre los diferentes minerales bajo una misma unidad, dado que no es lo mismo producir una tonelada de piedra caliza respecto a una onza de oro; y evaluar la evolución con respecto al tiempo hasta alcanzar la muerte comercial del planeta.

Desde la perspectiva del análisis exergético presentado en este artículo, los autores consideran que se puede dar soporte a las autoridades nacionales para:

- Evaluar los impactos asociados a la disponibilidad de los recursos minerales dada la medición de su pérdida.
- Analizar la incidencia sobre la vida útil de los depósitos minerales energéticos y no energéticos, así como de las políticas y prácticas de reciclaje para prevenir la disposición final de recursos, los cuales podrían ser nuevamente valorizados.
- Comprender los procesos de extracción, refinamiento y comercialización de minerales que operan hoy en día desde una visión termodinámica.
- Fomentar la internalización de los costos de reposición exergética dentro de los precios asignados a los minerales por el mercado, con el fin de reflejar el valor físico del capital natural extraído del subsuelo nacional.
- Facilitar el conocimiento y comunicación de los principios de la termodinámica y su estrecha relación con el patrimonio geológico del país dentro de los procesos de “eco-alfabetización”.

Conclusiones

El análisis exergético puede ser empleado como una metodología de evaluación y valoración del agotamiento de los recursos minerales haciendo uso de conceptos termodinámicos, y de ninguna forma intenta sustituir a otros métodos de evaluación, sino todo lo contrario, pretende complementarlos. Por lo tanto, los autores, reflexionando sobre el curso que está tomando la tierra hacia la ocurrencia de los escenarios “grises” de Pandora y Thanatia, ven la posibilidad de usar la herramienta para mejorar los métodos de gestión del sector extractivo colombiano,

sin ir en contravía de los análisis ambientales y sociales realizados desde otras disciplinas del conocimiento.

Con el presente análisis efectuado sobre una situación de ciencia ficción, así como del planteamiento hipotético del planeta crepuscular, este artículo llama la atención sobre la prioridad de promover una gestión sostenible del capital mineral; especialmente, cuando resulta evidente que la abundancia de estos elementos se da en aquellas zonas del territorio colombiano donde existe la presencia de comunidades vulnerables o que presentan características de pobreza extrema.

Referencias

- Botero, E. 2000. Valoración exergética de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fósiles. Memoria para la obtención del grado de Doctor. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.
- BP – British Petroleum. 2013. BP Statistical Review of World Energy June 2013. http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf. (Consultado en octubre de 2013).
- Brundtland, G. 1987. Our Common Future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development, Oxford, Oxford University Press.
- Calvo, G. 2012. An Analysis of Spain's Mineral Balance from a Thermodynamic Perspective. Proyecto fin de Máster. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.
- Carmona, L. 2014. An exergy and a thermoeconomic analysis of Colombian mineral resources. Proyecto fin de Máster. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.
- Dincer, I. y Cengel, Y. 2001. “Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering”. *Entropy* 3: 116–149. Doi: 10.3390/e3030116. <http://www.mdpi.com/1099-4300/3/3/116>. (Consultado en octubre de 2013).
- Dincer, I. y Rosen, M. 2007. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Oxford – UK: Elsevier.
- Grigor'ev, N. 2000. “The average mineral composition of the upper continental crust”. *Uralian Geological Journal* 3: 3–21.
- Höök, M., Sivertsson, A. y Aleklett, K. 2010. “Validity of the fossil fuel production outlooks in the IPCC Emission Scenarios” *Natural Resources Research* 19(2): 63–81.
- Kesler, S. 2010. Linkages of Sustainability, Vol. 4, Chap. Geological Stocks and Prospects for Nonrenewable Resources (MIT Press, Cambridge, MA).
- Kooroshy, J., Meindersma, C., Podkolinski, R., Rademaker, M., Sweijs, T., Diederer, A., M., B. y de Goede, S. 2009. “Scarcity of Minerals. A Strategic Security Issue”. *The Hague, Centre for Strategic Studies* N° 02- 01-10.
- Millero, F. J., Feistel, R., Wright, D. G. y McDougall, T. J. 2008. “The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale”. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 55(1): 50–72.
- Naredo, J. y Parra, F. 1993. Hacia una ciencia de los recursos naturales. Madrid- España: Ed. Siglo XXI.
- Neumayer, E. 2000. “Scarce or Abundant? The Economics of Natural Resource Availability”. *Journal of Economic Surveys* Vol. 14, No 3: 307–335.

- Quattrochi, D. y Luvall, J. 2004. Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing. CRC Press. Richmond, U.S.A.
- Quinby-Hunt, M. S. y Turehian, K. K. 1983. "Distribution of elements in sea water". *Eos, Transactions American Geophysical Union* 64(14): 130-130.
- Rosen, M. y Dincer, I. 1997. "On exergy and environmental impact". *International Journal of Energy Research* 21: 643-654.
- Valero, A., Valero, A. y Arauzo, I. 2006. Evolution of the Decrease in Mineral Exergy Throughout the 20th Century. The Case of Copper in the US. http://www.exergoecology.com/papers/Valero_ecos_%25202006.pdf. (Consultado en octubre de 2013).
- Valero, A. 2008. Exergy Evolution of the Mineral Capital On Earth. Memoria para la obtención del grado de Doctor. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España.
- Valero, A., Agudelo, A. y Valero, A. 2009. The Crepuscular Planet Part I: A Model for the Exhausted Atmosphere. 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization. Agosto 31 – Septiembre 3, 2009, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- Valero, A. y Valero, A. 2012. What is the cost of losing irreversibly the mineral capital on Earth? 25th International Symposium ECOS 2012, Junio, Perugia, Italia.
- Valero, A. y Valero, A. 2014. Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources. A cradle to cradle life cycle assessment of the Earth. World Scientific Publishing. London – UK: Imperial College Press.
- WFF - World Foresight Forum, 2011. The Resource Scarcity Nexus: Challenges for the 21st Century, 11-15 Abril 2011. <http://www.hcss.nl/reports/issue-brief-no-4-the-resource-scarcity-nexus-challenges-for-the-21st-century/82/> (Consultado en octubre de 2013).