

# De la Utilización de Recursos y su Perspectiva a la Luz de la Sostenibilidad. El Aporte del Análisis Exergético

Karem Johanna Castro Peláez\*  
Carlos Andrés Uribe Trujillo\*\*

## Resumen

El desarrollo económico de los últimos siglos se explica por la presencia de tres factores de producción: capital, trabajo y uso de exergía (energía disponible) de los combustibles de origen fósil. La manera como se conjugan estos factores, es decir, el sistema que sostiene nuestros patrones de consumo, está en contravía de las dinámicas de los ecosistemas naturales y por lo tanto de la sostenibilidad a largo plazo de las especies que dependen de estos recursos. El artículo propone una manera diferente de evaluar los recursos para tomar decisiones desde la perspectiva de los análisis exergéticos, lo cuales permiten objetivar todas las manifestaciones físicas en unidades energéticas independientes de su valor económico para así realizar una gestión sostenible de los recursos renovables y valorar las estrategias que se ajustan mejor a las condiciones ecológicas de nuestro entorno.

*\* Ingeniera química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Candidata a Msc. en Ingeniería Química de la misma universidad. Actualmente se desempeña como ingeniera de Delta Climático S.A.S.*

*\*\* Ingeniero ambiental de la Escuela de Ingeniería de Antioquia y antropólogo de la Universidad de Antioquia. Actualmente se desempeña como coordinador técnico de Delta Climático S.A.S.*

## On Resource Use and its Perspective in the Light of Sustainability. The Contribution of Exergetic Analysis

### Abstract

Economic development in the last few centuries is accounted for the presence of three factors of production: capital, work and exergy use (available power) of fossil-origin fuels. The way how these factors are conjugated, that is, the system supporting our consumption patterns, is going the wrong way down natural ecosystem dynamics, and is therefore going the wrong way towards long-term sustainability of the species relying on those resources. This paper puts forward a different way to assess resources in order to make decisions from the perspective of exergetic analyses, allowing to objectify all physical representations in energetic units independent from their economic value so as to accomplish sustainable management of renewable resources and assess the strategies better adjusting to our environment ecological conditions.

### Palabras clave:

Combustibles fósiles, impactos ambientales, gestión de recursos, sostenibilidad, exergía, Capital Natural Crítico.

### Keywords:

Fossil fuels, environmental impacts, resource management, sustainability, exergy, Critical Natural Capital.

**Una sociedad basada en el uso insostenible de la energía fósil**

Antes de la Revolución Industrial y antes de que viviéramos en unas sociedades jerarquizadas, la energía era obtenida de los músculos de los animales, entre los cuales el ser humano se encontraba por igual. Pero el desarrollo de las sociedades humanas y la articulación de sus miembros en la búsqueda de un objetivo común permitieron profundas transformaciones del entorno. Es el caso por ejemplo de las llamadas sociedades hidráulicas (Harris, 1994) que, mediante la manipulación de las fuentes de agua y la construcción de grandes estructuras, aprovecharon el potencial de este recurso y movieron el mundo. Desde el siglo XIX, las fuerzas que motivaron el crecimiento de las sociedades han sido sustituidas por máquinas que funcionan con combustibles fósiles, lo que lleva al mundo actual a consumir la biomasa procesada por las fuerzas naturales durante millones de años, para satisfacer las necesidades energéticas de

la era moderna (Ayres, Turton y Casten, 2007).

Hasta los años setenta del siglo pasado, los recursos energéticos, especialmente los combustibles fósiles, eran considerados ilimitados y su costo en términos económicos era bajo, lo cual, entre otras razones, incitó a usarlos de una forma ineficiente y sin consideración por los problemas ambientales originados (Rosen, 2002a).

A comienzo de los años ochenta, se empezó a dar mayor importancia a los procesos de transformación de la energía y a su relación con el ambiente, y se evidenciaron algunos de sus impactos (Rosen, 2002b; Rosen & Dincer, 2003):

- El cambio de los patrones climáticos globales a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero;
- La destrucción de la capa de ozono, especialmente por el uso de sustancias clorofluorocarbonatadas;
- Las lluvias ácidas originadas en el uso de combustibles con altos contenidos de azufre;

- La disminución de la calidad del aire;
- La contaminación de las fuentes hídricas;
- El aumento en la tasa de generación de residuos sólidos;
- La generación de residuos peligrosos (entre ellos, radioactivos);
- Los daños irreparables en ecosistemas lénticos y fuentes superficiales de agua causados por los derrames de petróleo;
- La degradación del suelo por el uso intensivo de fertilizantes químicos en los cultivos.

Al ritmo actual de consumo, y a la luz de las tecnologías en uso hoy en día, las reservas de petróleo serán suficientes para 41 años más; las de gas natural, para 64, y las de carbón, para 155 años (Campbell & Laherrère, 1998). En este escenario, los combustibles fósiles tarde o temprano escasearán, y se generará una mal denominada crisis energética, pues la tendencia indica que el agotamiento de las fuentes usadas actualmente producirá la necesidad de explotación de nuevas reservas; bajo esta perspectiva, la crisis se desatará por fuentes de energía de alta calidad o alta exergía<sup>1</sup>.

Hasta el año 2002, se consumieron  $1,43 \times 10^{14}$  L de petróleo, y queda por explorar

<sup>1</sup> La exergía se define como la cantidad máxima de trabajo obtenido cuando un sistema es llevado, a través de procesos reversibles, a un estado de equilibrio termodinámico con los componentes comunes del entorno, lo que implica interacciones del sistema con los componentes de este ambiente. Es una medida del potencial existente para producir cambios en un sistema o un flujo, como consecuencia de no estar en completo equilibrio con el ambiente. Cuando un sistema no está en equilibrio con el entorno, tiene un importe positivo de exergía, mientras cuando está en equilibrio, su exergía es cero. Esta propiedad lleva a considerar la exergía como una alternativa para ser utilizada en estudios de tipo ambiental (Velásquez, 2009).





Fotografía: Stock.XCHNG

una cantidad similar (Campbell & Laherrere, 1998). Desde el comienzo de la Revolución Industrial,  $3 \times 10^{14}$  kg de carbono contenido en los combustibles fósiles se han oxidado y liberado en la atmósfera. Las reservas conocidas, incluidos el carbón, el petróleo y el gas natural, generarán la oxidación de cerca de  $5,0 \times 10^{15}$  kg de carbono adicional, y causarán un desequilibrio ecológico grave, pues estas emisiones son consideradas gases con efecto invernadero que introducen entropía en el sistema termodinámico mundial que denominamos *clima*. Así, pues, existe una necesidad apremiante de utilizar otras fuentes de energía, no sólo por la escasez de recursos fósiles, sino por los cambios que se van a producir en el ecosistema planetario en caso de seguir con los patrones actuales. Las inevitables consecuencias ambientales del uso excesivo de combustibles fósiles llevan a restringir de manera urgente su consumo, incluso más rápidamente de lo que impone el

ritmo de su agotamiento (Sims, Rogner & Gregory, 2003). En 1912, Rudolf Diesel escribió: *“El uso de aceites vegetales en los motores puede ser insignificante hoy, mas en el recorrer del tiempo puede que sean tan importantes como el petróleo o el carbón”* (Murugesan et al., 2008). Casi un siglo después, estas palabras se están cumpliendo. El desarrollo económico de los últimos siglos se explica por la presencia de tres factores de producción: capital, trabajo y uso de exergía (energía disponible) de los combustibles de origen fósil. Las sociedades industriales están construidas sobre la base de un uso no sostenible de los recursos, los cuales, después de ser usados, son esparcidos en el ambiente en forma de residuos; se generan entonces cambios en las condiciones ambientales de una manera que, aun con dificultad, se puede entender, pero que, por la complejidad de los fenómenos, es imposible predecir (Ayres & Warr, 2005). La naturaleza funciona de forma inversa. Usa la exergía

proveniente del sol mediante la fotosíntesis; luego, la materia es aprovechada y reaprovechada continuamente en procesos biológicos que han ocurrido durante millones de años. De esta manera, crea las condiciones para la vida del planeta, entre otras construye depósitos de recursos no renovables (combustibles fósiles y minerales) que la sociedad usa en sus procesos (Wall & Gong, 2001). El modelo actual de sociedad no es sostenible a largo plazo. Con los seres humanos puede suceder lo mismo que ocurre con colonias de bacterias: crecer en forma exponencial en un corto periodo para después colapsar destruyendo el medio y la vida (Ayres, 2004). El problema está en la forma como el sistema económico evalúa los recursos no renovables: considera su uso como creación de valor sin considerar su agotamiento. Todavía los recursos no renovables, especialmente los combustibles fósiles, son limitados. Por lo tanto, es necesario un nuevo concepto que relacione las leyes económicas con las leyes de la física y de la ecología (Ayres, 1999).





**El análisis exergético, un aporte al uso sostenible de los recursos**

Frente a este panorama, en 1987 la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo –CMMAD– de la Organización de las Naciones Unidas, definió el desarrollo sostenible como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (United Nations, 2006). El concepto tiene cuatro principios básicos:

1. Los recursos naturales extraídos de la litosfera no pueden ser sistemáticamente acumulados en la ecosfera.
2. Las sustancias producidas por la sociedad no pueden ser acumuladas en la ecosfera.
3. Las condiciones físicas de producción y diversidad dentro de la ecosfera no deben ser sistemáticamente deterioradas.
4. El uso de los recursos tiene que ser eficiente y ajustado a la satisfacción de las necesidades humanas.

tanto, la sociedad camina en dirección contraria al darles prioridad a las condiciones del mercado y deteriorar el medio ambiente (Wall & Gong, 2001). Para reducir el consumo de los recursos naturales, algunos avances importantes se han venido dando en los últimos años, por ejemplo, el desarrollo tecnológico de sistemas de generación de energía de mayor eficiencia o la identificación de fuentes alternativas de energía. Pero a corto plazo, se deben realizar otros esfuerzos para asegurar un desarrollo sostenible, e incrementar el uso de la exergía renovable.

Es necesario proponer modelos para la gestión sostenible<sup>2</sup> de recursos, que se propicie mediante metodologías sostenibles de gestión de recursos renovables y agotables, con el uso de indicadores ambientales coherentes. Tales modelos se deberían desarrollar localmente para permitir un buen uso de materias primas, tierras y tecnologías y un manejo integral de los subproductos, con el fin de no incurrir en los tan mencionados problemas de sobreexplotación de recursos o en el riesgo de

vulnerar la seguridad alimentaria de los pueblos.

La necesidad de políticas para manejar los recursos en lugares donde los daños han sido irreversibles ha llevado la corriente de la *economía ecológica*—que define los recursos naturales desde su función como parte de las redes de interacción de los ecosistemas— al concepto de Capital Natural Crítico –CNC–<sup>3</sup>. Este concepto permite ir más allá de la lógica convencional de la economía que mira los recursos como fuente de capital para la producción, y aporta un esquema de razonamiento que permite proponer modelos de gestión de recursos de acuerdo a sus funciones en la naturaleza y define el umbral mínimo de recursos que no deben ser tocados.

En términos generales, algunos autores han planteado que se podría lograr una gestión sostenible de los recursos mediante los siguientes pasos:

1. Garantizar la tasa de renovación si el recurso es renovable, o la tasa de sustitución si el recurso es agotable.
2. Garantizar la protección del CNC para garantizar el respeto de las funciones ambientales

<sup>3</sup> Se puede definir el Capital Natural Crítico como la cantidad de capital necesario para realizar unas funciones críticas, que no puede ser sustituida por cantidades de otros capitales con el fin de cumplir las mismas funciones. Para Turner (1993), el capital natural crítico está constituido por aquellas partes vitales del ambiente que contribuyen a los sistemas de soporte a la vida, la biodiversidad y otras funciones necesarias definidas como especies y procesos claves. Para Noël y O'Connor (1998), se define como el conjunto de recursos ambientales que, a una escala geográfica dada, asegura las funciones ambientales importantes y para las cuales no existe ningún sustituto en términos de capital manufacturado o humano. Para Noël (2000), hacen parte del Capital Natural Crítico: a) el patrimonio genético; b) el capital natural de soporte a la vida; c) los elementos cuya función ambiental no puede ser sustituida a un costo aceptable (citados en Escobar, 2005).

<sup>2</sup> Esta sostenibilidad se entiende desde el punto de vista técnico, económico, social y ecológico.

La naturaleza funciona con base en estos cuatro principios. Entre

críticas, es decir, aquellas que sirven de soporte a la vida.

3. Establecer unos criterios y mecanismos para garantizar el manejo adecuado de los servicios ambientales prestados en casos tales como la contaminación del aire causada por las emisiones de gas contaminante, o la contaminación del suelo y de las aguas causada por los desechos líquidos y sólidos.
4. Establecer las retribuciones por los impactos causados sobre la economía y las condiciones de vida locales por la explotación del recurso, partiendo de que si la explotación de un recurso natural es necesaria, esta explotación debe mejorar las condiciones de vida de las comunidades tanto en lo social como en lo económico.

Para facilitar la toma de decisiones respecto a la utilización de recursos desde esta visión, se han propuesto análisis exergéticos, ya que permiten objetivar todas las manifestaciones físicas en unidades energéticas

independientes de su valor económico (Valero y Naredo, 1999). Desde esta perspectiva, cualquier producto, recurso natural o artificial, proceso productivo o emisión contaminante pueden ser valorados equitativamente, pues la exergía presenta tres características que la convierten en un instrumento ideal para la obtención de indicadores ambientales: incluye tanto la cantidad como la calidad, y mide el desequilibrio del sistema con respecto al ambiente (Wall, 1977).

Ello conlleva además la valoración de subproductos, ya que los problemas de reparto de costes entre varios productos resulta elemental; en este caso, el coste exergético se define como la suma de todos los recursos que han sido necesarios para construir un producto a partir de sus componentes, expresado en unidades exergéticas (Valero y Naredo, 1999).

La utilización del análisis exergético como indicador ambiental podría ayudar a una gestión adecuada de los recursos renovables desde una perspectiva

sostenible, y a una valoración de las estrategias (de aquellas disponibles en la literatura y en el mercado) que mejor se ajustan a las condiciones ecológicas de nuestro entorno. Las estrategias que tienen altas probabilidades de sostenibilidad tienden a estar en consonancia con las dinámicas naturales, al emular los modelos que son exitosos en los ecosistemas locales.

## Referencias bibliográficas

- Ayres, R. U. (1999). The Second Law, the Fourth Law, Recycling and Limits to Growth. *Ecological Economics*, 29, 473-483.
- Ayres, R. U. (2004). On the Life Cycle Metaphor: Where Ecology and Economics Diverge. *Ecological Economics*, 48, 425-438.
- Ayres, R. U.; Turton, H.; Casten, T. (2007). Energy efficiency, sustainability and economic growth. *Energy*, 32, 634-648.
- Campbell, C. and Laherrère, J. H. (1998, March). The End of Cheap Oil. *Scientific American*, 278(3), 78-83.
- Escobar M., John F. (2005). Identificación y evaluación del Capital Natural Crítico en proyectos de explotación de hidrocarburos a partir de la plataforma SIG. Tesis de grado. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Harris, M. (1994). *Nuestra Especie*. Madrid: Alianza Editorial. (Edición original en inglés: *Our Kind: Who We Are, Where We Came From, Where We Are Going* [1990]).
- Murugesan, A.; Umarani, C.; Subramanian, R.; Nedunchezian, N. (2008). Biodiesel as an Alternative Fuel for Diesel Engines A Review. *Renewable and sustainable energy reviews*, XXX.
- Rosen, M. A. (2002a). Assessing Energy Technologies and Environmental





Impacts with the Principles of Thermodynamics. *Applied Energy*, 72(1), 427-441.

Rosen, M. A. (2002b). Energy Crisis or Exergy Crisis? *Exergy, an International Journal*, 2(3), 125-127.

Rosen, M. A. and Dincer, I. (2003). Exergy–Cost–Energy–Mass Analysis of Thermal Systems and Processes. *Energy Conversion & Management*, 44, 1633-1651.

Sims, R.; Rogner, H.; Gregory, K. (2003). Carbon Emission and Mitigation Cost Comparisons between Fossil Fuel, Nuclear and Renewable Energy Resources for Electricity Generation. *Energy Policy*, 31, 1315-1326.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2006). Trends in Sustainable Development. New York. Recuperado de [http://www.un.org/esa/sustdev/publications/trends2006/trends\\_rpt2006.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/publications/trends2006/trends_rpt2006.pdf).

Valero, A. y Naredo, J. (1999). *Desarrollo Económico y Deterioro Ecológico*. Madrid: Ed. Fundación Argentaria.

Velásquez, H. (2009). Avaliação Exergética e Exergo-Ambiental da Produção de

Biocombustíveis. Tese Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.

Wall, G. (1977). Exergy - A Useful Concept within Resource Accounting. Report no. 77-42. Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Sweden. Recuperado de <http://exergy.se/goran/thesis/paper1/paper1.html>.

Wall, G. and Gong, M. (2001). On Exergy and Sustainable Development. Part 1: Conditions and Concepts. *Exergy, an International Journal*, 1(3), 128-145.

