

# Disponibilidad de recursos materiales y energéticos

**Celso Alberto Rojas Pukall**  
Facultad Politécnica, Universidad Nacional del Este  
Ciudad del Este, Paraguay  
celso.rojas@fpune.edu.py

## Resumen

El trabajo presentado surge de la necesidad detectada en la población, de un estado de mayor consciencia sobre las implicancias y las condiciones para la disponibilidad de recursos materiales y energéticos mundiales de los cuales depende el metabolismo del humano moderno. El propósito es proveer los fundamentos de esas implicancias del estado de disponibilidad de estos recursos, como vía para la generación de un estado de mayor consciencia en la población, acerca de este hecho real. Se ha implementado una técnica analítica documental orientada a extraer conocimientos a partir del corpus bibliográfico consultado. El enfoque es mayormente cuantitativo en cuanto a proveer datos sobre disponibilidad de recursos naturales fundamentales. El aspecto cualitativo consiste en una interpretación de la estimación multifactorial del grado de disponibilidad de estos recursos y su repercusión en la consciencia humana. Como resultados se presentan una sucinta estadística del grado de disponibilidad de los recursos naturales energéticos y no energéticos, renovables y no renovables, acompañada de una breve descripción de la evolución histórica del modelo de consumo energético humano. Se concluye, principalmente, que el humano ha puesto la vida de su especie bajo fuerte dependencia de recursos finitos no renovables que muestran ser de muy corta duración al ritmo de consumo actual. En consecuencia se formulan algunas sugerencias orientadas a adecuar el complejo metabolismo humano actual, desde un enfoque para su sustentabilidad.

**Descriptores:** recurso energético, sustentabilidad, coherencia.

## Abstract

The work presented arises from the need detected in the population, for a greater awareness on the implications and the conditions for global material and energy resources actual availability conditions, on which the modern human's metabolism depends. The purpose is to provide the foundations and to elucidate the implications of these resources availability, as a means for the generation of a state of greater people's consciousness about this real fact. A documentary analytical technique has been carried out, oriented to extract knowledges from the bibliographic corpus consulted. The approach is mainly quantitative in terms of providing data on the availability of fundamental natural resources. The qualitative aspect consists of an interpretation of the multifactorial estimation made about the degree of these resources availability, and its impact on human consciousness. A brief statistic is presented as result on the availability degree of natural resources: energetic and non-energetic, renewable and non-renewable ones; together with a concise description of the energy consumption model evolution throughout history. A conclusion is drawn, mainly on the fact that human being has placed his species life under strong dependence on finite non-renewable resources that show to be of very short duration at the actual consumption rate. Consequently, some suggestions are made, oriented towards adapting the current complex human metabolism, from a sustainability standpoint.

**Keywords:** energetic resource, sustainability, coherence.

## 1. Introducción

A la luz de la evolución histórica de los hechos, parece atinado asumir que la tendencia a desarrollar tecnología es parte de la misma naturaleza humana. La acelerada sucesión de hechos en las últimas décadas, favorecida por la disponibilidad

de energía transitoriamente abundante y de fácil acceso, dan testimonio de verdad a esta hipótesis. Sin embargo este mismo desarrollo desenfrenado es señalado como la principal causa del problema actual que implica la continuidad de su práctica: una perspectiva de descenso energético por agota-

miento de aquellas formas de energía provenientes de fuentes primarias concentradas y de alto rendimiento. El problema señalado es un factor de un escenario problemático multifactorial más complejo, que conecta, por ejemplo, con la alteración de las condiciones atmosféricas de las cuales depende la vida humana. En este contexto la definición y la delimitación del problema de investigación deben enunciarse evitando el error de fraccionar el problema en partes disconexas que pudieran conducir a propuestas-soluciones divergentes con respecto a la solución-explicación real deseable.

Atendiendo la observación anterior, el planteo de la problemática objeto del trabajo se define y delimita en estos términos: *Necesidad de estado de mayor consciencia de parte de la población, acerca de las implicancias de los condicionantes naturales del consumo de recursos materiales y energéticos mundiales de los que depende el metabolismo humano*. Como se verá más adelante, esta necesidad se fundamenta en el escenario de descenso energético actual, el cual presenta rasgos estructurales a la luz de los principios y leyes de la física, configurando así una lúgubre perspectiva de continuo decrecimiento de disponibilidad de tales recursos.

### Objetivos

En respuesta al panorama planteado por el problema de investigación, el propósito del presente trabajo es coadyuvar desde la ciencia, a la generación de estado de mayor consciencia de parte de la población, acerca de los fundamentos e implicancias del estado de disponibilidad de recursos materiales y energéticos mundiales de los que depende el metabolismo humano. Este propósito genéricamente enunciado se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

1. Explicitar la relación de dependencia de la especie humana respecto a los recursos naturales según el tipo de recurso.
2. Identificar variables que inciden en la disponibilidad de recursos naturales del metabolismo humano.
3. Diagnosticar el estado de disponibilidad de recursos naturales esenciales en función de su flujo de consumo.
4. Identificar condiciones para una adecuación humana armónica al escenario material-energético emergente.
5. Mostrar la necesidad de mayor desarrollo científico dentro del tema de la sustentabilidad humana.

### Recursos naturales y vida humana

La dinámica material-energética se rige por principios y leyes universales, que precisan ser tenidos en cuenta para tratar todo problema real, entre los más fundamentales principios universales se cuentan los dos siguientes [30]:

- Primer principio de conservación de la masa-energía: la masa-energía del universo se conserva.
- Segundo principio de la termodinámica: en cada proceso material-energético que tenga lugar en el universo, parte de la energía gastada en el proceso, se convierte en energía calórica dispersa de forma irreversible.

Ante la verdad expresada por estos dos principios fundamentales, se impone recordar y resaltar la condición finita del sistema solar, y en particular las limitaciones de recursos del planeta Tierra como lugar donde se originó y pervive hasta el presente la especie humana. La Tierra, como albergue de vida humana presenta condiciones únicas en todo el universo conocido, de tal manera que al tiempo presente, y por cualquier medio conocido, a la humanidad le es imposible abandonar este planeta y migrar a algún cuerpo celeste donde pueda seguir viviendo. Naturalmente, a los dos principios físicos formulados precedentemente, hay que sumar la cadena trófica que depende enteramente de los recursos materiales inertes y las fuentes de energía. El enfoque del presente trabajo se centra en los recursos materiales-energéticos mencionados precedentemente, cuya gran amplitud y complejidad obliga a delimitar el discurso de tal forma que apenas se rozan otras facetas similarmente importantes, tales como la alteración climática o los precarización sanitaria, facetas en las cuales también se evidencia una significativa huella antrópica.

Con relación a los recursos naturales materiales y energéticos considerados desde el enfoque de su aprovechamiento en favor de la vida humana, importa tener en cuenta su disponibilidad a través del tiempo. Esto remite a clasificarlos entre *renovables* y *no renovables*. No obstante, la renovabilidad a que se hace referencia en este trabajo, se circunscribe a las posibilidades de reciclaje del sistema terrestre mediante la energía proveída por el Sol, esta energía actúa sobre la Tierra favoreciendo la reposición de los recursos naturales vitales. En virtud del segundo principio de la termodinámica, la renovación de los recursos terrestres mediante la energía radiante del Sol ocurre al costo de la nucleosíntesis del material combustible que ocurre en el centro solar: el hidrógeno que se transforma en helio; este proceso de fusión nuclear altamente exoérgico, dada su irreversibilidad espontánea

supone una degradación desde el punto de vista energético. Y esta degradación es siempre mayor que la regeneración causada, de los llamados recursos renovables en la Tierra. En resumen: es imposible renovar en términos netos todo sistema físico aislado, y solo es posible con influencia de algún factor externo generando a su vez una mayor degradación del sistema en que ocurre ese factor externo.

Se define como *recurso natural renovable*, todo recurso físico consumido en el desarrollo vital humano, que puede restituirse a su estado de utilidad original. Se define como *recurso natural no renovable*, todo recurso físico consumido en el desarrollo vital humano, cuyo estado de utilidad ocurre una sola vez. Cabe señalar que el límite entre recursos renovables y no renovables es difuso, es algo así como ocurre con las estrellas, que pueden ser de primera generación o de generación posterior producto del reciclado de material cósmico. A los efectos de este trabajo, son precisamente las transformaciones cósmicas de este orden espacio-temporal las que imponen límites de procesos que forman y destruyen planetas; y como la cantidad de materia en la Tierra es fija, todo ese material es colectivamente considerado no renovable luego del fin del planeta como tal. A otra escala espacio-temporal menor, en alguna medida muchos componentes materiales del conjunto planetario terrestre presentan ciclos a través de los cuales fluye el material, renovándose así en diversa medida. Por un lado, un recurso puede reciclarse a ritmo extremadamente lento en la escala temporal de la vida humana, por ejemplo el petróleo<sup>1</sup>; y por otro, el recurso puede reciclarse a ritmo mucho más rápido, por ejemplo la biomasa; el caso del agua es un ejemplo de recurso que se renueva de diversa manera y a ritmo diverso, dependiendo de qué tan cerca de la corteza externa de la geosfera<sup>2</sup> se encuentre, de manera que según llegara a percolarse a través del suelo, el ciclo se ralentizará, pudiendo en caso extremo depositarse en acuífero donde puede permanecer por milenios [43].

Tomando en consideración los dos principios físicos enunciados precedentemente, los recursos naturales *materiales* terrestres pueden siempre volver a restituirse a su estado útil original, pero solo en principio, y siempre mediante nuevo trabajo y costo energético adicional. Una vez que estos recursos han llegado al fin de su estado útil, sin embargo, su restitución puede darse con diverso grado de complejidad y dificultad, pudiendo ocurrir con o sin intervención humana.

En rigor, la renovabilidad de todos estos recursos solo puede ocurrir en alguna fracción de su

disponibilidad inicial, y está limitada por la eficiencia de los procesos de recuperación, la cual puede ser muy alta, pero siempre es imposible obtenerlos de nuevo en su cantidad completa inicial. En este sentido, los denominados recursos naturales *energéticos renovables* terrestres son aquellos que pueden restituirse a su estado útil original, sujetos a condiciones que dependen de los sistemas físicos donde tienen lugar, y se asume que su renovabilidad puede ser completa, por ejemplo: las corrientes de agua y aire.

De acuerdo con los mismos principios antes mencionados, también es posible que los recursos naturales considerados no renovables, sean renovables al menos en una fracción muy limitada de su disponibilidad inicial. Sin embargo, el destaque importante aquí es que su renovación demanda procesos sumamente complejos típicamente acompañados de excesivo consumo energético a efectos prácticos; y sumado a esto, puede precisarse de plazos de tiempo tan grandes que escapan a la capacidad humana de esperar su reposición, descontando la enorme incertidumbre que involucran los plazos que por su larga extensión temporal ya ni siquiera dependen de sus planificadores originales. Un ejemplo paradigmático de esta tipología lo constituyen las denominadas tierras raras, minerales de que depende críticamente la industria electrónica actual y la consecuente digitalización del modo de vida humano.

## 2. Método

En el presente trabajo se ha aplicado la técnica analítica documental orientada a la extracción de conocimiento a partir del corpus bibliográfico consultado. El enfoque es mayormente cuantitativo: evaluar tan precisamente como los datos disponibles posibilitan, la disponibilidad de recursos naturales fundamentales de los cuales depende el metabolismo humano actual. El aspecto cualitativo del trabajo consiste en la interpretación de la estimación multifactorial del grado de disponibilidad de los recursos naturales en vista de los principios y las leyes naturales que condicionan tal disponibilidad; y su repercusión en la sustentabilidad de la vida humana, con la intención de obtener pautas del modelo energético civilizador por construir para que este sea coherente con la lógica de tales principios y leyes naturales con vista a la sustentación vital humana a través del tiempo.

El alcance del trabajo trasciende lo meramente descriptivo, llegando a proveer elementos de interpretación/explicación de las implicancias del estado de disponibilidad de recursos fundamentales

<sup>1</sup>Por este motivo el petróleo es considerado no renovable a todos los efectos en este trabajo

<sup>2</sup>Geosfera: Parte sólida de la Tierra constituida por diversas capas concéntricas, desde la litosfera hasta el núcleo terrestre [28].

del metabolismo humano, sobre la sustentabilidad de este metabolismo.

Se trata de un diseño no experimental basado en información documental y observacional en un amplio sentido, del ambiente objeto de análisis. El alcance temporal es transversal referido a la realidad actual del año 2021.

Para el tratamiento del objeto de investigación se han identificado variables que resultan significativas para el tratamiento de los recursos naturales que metaboliza el sistema económico humano. Las principales son definidas a continuación.

- *Recurso natural*: se refiere al tipo de recurso caracterizado según su incidencia en el metabolismo humano sobre el entorno natural. Se lo estima según su naturaleza en cuanto a renovabilidad y a contenido energético, además de su funcionalidad definida por el beneficio obtenido del mismo.
- *Energía*: capacidad para producir trabajo, se trata de un recurso que precede a los demás porque es pre-requisito determinante del acceso humano al aprovechamiento de los mismos: sin energía es imposible acceder a todo recurso vital. La unidad de medida estándar internacional es el julio (J), además de otras también muy comunes, como la caloría, que históricamente se empleaba exclusivamente para medir cantidad de calor pues se ignoraba que el calor es energía; para medir grandes cantidades de energía, frecuentemente se utiliza la unidad tep que representa la cantidad de energía que provee una tonelada de petróleo convencional.
- *Población*: se refiere a la cantidad de habitantes que acceden a los recursos y abarca a toda la especie humana.
- *Consumo energético per cápita*: flujo de consumo de energía promediado sobre la población considerada. Se lo puede medir como la razón julios por segundo y por habitante (W/h o J/s·h).
- *Ciclo del recurso*: tiempo que toma la reposición del recurso natural. El proceso de reciclaje puede ser con intervención humana y el tiempo que toma el cierre del ciclo es variable. Se estima en unidades de medida de tiempo, según su tamaño, ejemplos: día, año, milenio, ...
- *Clima*: variable multifactorial que caracteriza las condiciones atmosféricas de toda región geográfica. Los factores del clima suelen medirse cuantitativamente; por ejemplo la temperatura, en grados centígrados; la insolación o cantidad de energía solar recibida

por unidad de superficie; la humedad del aire, en porcentaje de su contenido de vapor de agua; la velocidad del viento, como la razón de kilómetros/hora, etc.

- *Estado de consciencia*: se refiere a todo lo que el humano advierte acerca de cualquier fenómeno real dado. Se estima por la acción-reacción del humano ante ese fenómeno.

### 3. Resultados

Con respecto a la sustentabilidad de la vida en la Tierra, se observa que la misma es producto de la conjunción de múltiples condiciones que han sido bastante estables a lo largo de la historia planetaria desde la época anterior inmediata a la aparición del hipotético primer germen viviente. Es lógico dar por sentado que siempre hubo alguna vía de continuidad vital desde entonces hasta el presente. Se asume entonces que a pesar de los eventuales cataclismos que habrán ocurrido y a los que se atribuye la desaparición de especies como las de los dinosaurios, por ejemplo, la pervivencia de las especies actuales indica que el hilo de la vida se ha podido sustentar desde su inicio hasta el presente.

A lo largo de la historia el *homo sapiens* se ha granjeado de diversa manera los requisitos y recursos para su metabolismo vital. Dependiendo de los recursos energéticos que los sustentaron; hubieron modelos metabólicos en una sucesión que comprende seis etapas, claramente diferenciadas unas de otras, correspondiendo cada una de ellas a un modelo en particular. Precisamente, lo que ha dominado y por ende ha determinado y caracterizado el estilo de vida, como lo señala [36], ha sido fundamentalmente la explotación de un recurso energético específico. En este punto, cabe hacer una acotación técnica: el consumo energético per cápita de cada modelo energético, en rigor solo se aplica al grupo humano que de manera homogénea se encuentra inserto en ese modelo. Sin embargo, lo que históricamente ha ocurrido es que han habido de manera concurrente en el tiempo, desarrollos de diversos modelos energéticos. Por esta razón, solo de manera aproximada es posible asociar un modelo energético a cada etapa, que es cabalmente lo que aquí se ensaya, y la razón de este proceder se limita a proveer una idea de la magnitud del consumo energético bajo cada uno de los modelos, señalando que lo que realmente habrá ocurrido es que el consumo real habrá sido significativamente menor, habida cuenta de que el análisis se guía preferentemente por la regiones geográficas en que los grupos humanos asentados fueron pioneros en evolucionar hasta llegar al modelo considerado.

La primera etapa se caracteriza como la forma más primitiva, en ella la vida era nómada y se sustentaba de la recolección de frutos vegetales, más la introducción paulatina en la dieta de carne animal como producto de la caza, se sitúa en el tiempo durante el periodo paleolítico superior. El final de este periodo se ubica en torno a 12.000 años atrás. Claramente se nota aquí cómo, el modelo energético, muy limitado al servicio de la alimentación, determinaba las actividades de recolección y caza de tales recursos alimenticios. De acuerdo con [14, 36], en este modelo energético el humano habría estado consumiendo energía a razón de 100 julios por segundo, vale decir 100 vatios, para conservar su dinámica basal o consumo básico vital, pero como ya conocía y usaba el fuego<sup>3</sup>, se suman otros 100 vatios de potencia energética, obtenidos por combustión de leña, dando un consumo per cápita de unos 200 vatios bajo este modelo.

A la etapa preagrícola de recolección y caza siguió la segunda gran etapa que arrancó hace aproximadamente 12.000 años. El modelo energético entonces imperante surgió de la actividad pastoril-agrícola manual. El periodo histórico corresponde al denominado periodo neolítico con empleo de herramientas aún de piedra aunque ya pulida, a diferencia del período anterior, con empleo de piedra labrada. Son dos los aspectos donde más se ha marcado una ruptura con el modelo anterior: a) el desarrollo de la agricultura como medio de sustentación de la alimentación, en sustitución de la recolección y la caza; y b) la sedentarización de la vida, en directa conexión con la actividad agrícola que demanda de trabajo y control, lo cual dio lugar a la construcción de vivienda, dada la necesidad de albergue permanente en el lugar de los cultivos. El final de esta etapa se estima habrá ocurrido unos 7.000 años atrás. A este modelo energético algunas fuentes, tales como [14, 36], atribuyen un ritmo de consumo energético per cápita estimado entre 580 y 600 vatios distribuidos de la siguiente forma: 200W alimentación + 200W uso doméstico (construcción de herramientas y albergue) + 200W agricultura (labranza de la tierra).

Luego advino la tercera etapa con el modelo energético agrícola avanzado iniciado unos 7.000 años atrás, con empleo de tracción a sangre animal y navegación a vela, con herramientas de metal (como el arado): de cobre, luego de bronce y finalmente de hierro, y beneficio masivo de la madera; su fin se da con el empleo de la escritura alfabética, lo cual ocurre de forma diferenciada en el tiempo, por región geográfica: alrededor de 3.000 años atrás en la regiones europea mediterránea y de oriente medio. La característica resaltante de esta etapa es la complejización de la

vida humana, principalmente en cuanto a la vida relacional interpersonal. Aparecieron las especializaciones ocupacionales en un marco relacional jerárquico donde los individuos más hábiles fueron ocupando naturalmente puestos más encumbrados en el reparto de los beneficios del incipiente progreso tecnológico, al amparo de las instituciones generadas con gran probabilidad, por ellos mismos. En consecuencia, parece atinado atribuir a este intervalo histórico la potenciación del constructo institucional, vale decir, las instituciones, muy necesarias para mantener un orden y avanzar coherentemente en dirección marcada por quienes ocupaban puestos más encumbrados en el grupo. Parece atinado asumir que este modelo relacional interpersonal jerárquico pudo ser resguardado siempre a partir de entonces hasta el tiempo presente mediante la invención de instituciones cuyo rol fue siempre mantener el orden establecido ante eventuales intentos por contrariar o evadir dicho orden; por ejemplo, al tiempo presente, este rol lo cumple la institución judicial-policial. A este modelo energético, [36] atribuye un ritmo de consumo energético per cápita estimado en unos 970 vatios distribuidos entre alimentación, uso doméstico, agricultura de tiro y transporte e incipientes industria artesanal y comercio.

La siguiente etapa, la cuarta, denominada pre-industrial, se ha iniciado en diversos tiempos según la región; de hecho, aún durante el siglo XX habían tribus viviendo en este modelo energético. Con respecto a las culturas europeas parece atinado situar su inicio coincidente con el del medievo, vale decir, en torno al siglo V. Caracterizan este modelo energético el aprovechamiento intensivo de los recursos energéticos de las corrientes de agua y aire mediante el empleo de ruedas hidráulicas y molinos de viento, a los que se acoplaban máquinas de construcción artesanal para moler, hilar y tejer (entre otros beneficios), se había consumado ya entonces, con hachas y sierras, una de las primeras serias alteraciones de la naturaleza en la forma de una avanzada deforestación, sumada a la grave merma y/o exterminio de ciertas especies animales, como es el caso del ave denominada dodo, a causa de su caza desmedida. Otro acto disruptor quizás aún más grave de la sustentabilidad vital que también ocurrió en esta época es la apertura de ciclos de minerales nutrientes, producto del traslado sin retorno de materia bajo la forma de alimentos, desde los suelos productivos hacia las crecientes urbes; el final de esta etapa se sitúa a mediados del siglo XVIII. Según la estimación encontrada en [36], el ritmo de consumo energético per cápita del modelo de esta etapa se sitúa en torno a 2.900 vatios distribuidos entre alimenta-

<sup>3</sup>Se considera, por las evidencias arqueológicas disponibles que el fuego puede haberse estado usando ya desde al menos un millón de años atrás.

ción, uso doméstico, agricultura de tiro y de forma creciente, transporte e industria.

Así se ha arribado a la quinta etapa, al nacimiento de la etapa de la revolución industrial a mediados del siglo XVIII, de la mano de la forma de combustible fósil primeramente explotada a gran escala: el carbón mineral y con él el incremento de la metalurgia del hierro. Inicia entonces otra gran agresión a la geosfera: la explotación minera a gran escala; se produce una creciente emigración desde las zonas rurales a los centros de producción industrial que gracias a la quema del carbón mineral y uso de la máquina a vapor dispara la demanda de mano de obra para la industria, a consecuencia de esta alimentación positiva del desarrollo industrial mediante el más energético carbón mineral, se acelera el aumento de población humana, y con ella se incrementa el consumo energético. De acuerdo con [14] a este modelo carbonífero energético mineral corresponde un ritmo de consumo energético per cápita en torno a 3.850 vatios, esta cantidad se reparte aproximadamente entre 350W alimentación + 1.600W uso doméstico y comercio + 1.200W industria y agricultura + 700W transporte.

Luego advino la sexta y última etapa ya concluida de evolución energética mundial, iniciada a mediados del siglo XIX, la que introdujo el empleo masivo del petróleo a vuelta de siglo, esta etapa suele denominarse segunda revolución industrial, [36] la denomina época moderna industrial. Durante esta etapa, ya hacia el final de la misma, el siempre creciente aporte energético obtenido del petróleo superó al del carbón mineral en torno a la década de los años 1960; el invento más importante para este desarrollo industrial: el acero, dio origen al ferrocarril, al barco a vapor al motor de combustión interna, y con el advenimiento de la electricidad, al telégrafo, luego al teléfono y al motor eléctrico; como colofón se concluye que esta segunda revolución industrial, que duró hasta la década de 1960 siguió acelerando el crecimiento de la población mundial. De acuerdo con [36], el consumo per cápita del modelo energético de esta época se sitúa en torno a 11.600W, muy próxima a la estimación encontrada en [14], la cual es 11.500W distribuidos de la siguiente manera: 500W alimentación + 3.300W uso doméstico + comercio + 4.500W industria y agricultura + 3.200W transporte.

Actualmente el mundo se encuentra en lo que se denomina la sociedad postindustrial (o del conocimiento, o de la informática, o digital). En las fuentes consultadas, el modelo energético de esta etapa se confunde con el modelo de la anterior etapa: de la revolución industrial avanzada,

pero se sugiere que con el desarrollo masivo de las TIC<sup>4</sup> tanto el PIB como el consumo energético siguen potenciándose. En esta etapa, la actual de inicio del siglo XXI, las actividades financieras han cobrado creciente importancia con la facilidad proveída por la alta conectividad de las TIC de la era digital actual, insertas en los grandes conceptos globalizantes: Internet y Web. Para que se diera este desarrollo explosivo de la informática y la comunicación, resultó clave el invento del transistor en el año 1947, el cual posibilitó la fabricación de circuitos electrónicos altamente integrados, cada vez más compactos, con que se desarrollaron las TIC. En un aspecto la conceptualización de esta etapa es controversial cuando en la literatura técnica se afirma que su característica marcante son los mayores valores relativos de la información, del conocimiento y de los servicios, comparados colectivamente con los valores de los recursos materiales, por un lado; sin embargo por otro lado, los hechos contradicen esta afirmación al observarse una competencia entre los grandes centros de poder siempre respaldados por fuerzas armadas, en busca de hacerse con los recursos materiales y energéticos claves para sustentar las industrias modernas tales como las de locomoción eléctrica (con baterías de litio y cobalto), armamento moderno y tecnologías digitales. En particular esta última solo es posible mediante los circuitos electrónicos de alta escala de integración, tales como procesadores de computadoras, teléfonos móviles, servidores y satélites sustentadores de las TIC. Actualmente se registra una demanda de recursos energéticos que es nueva: la que se usa para extraer, transportar y beneficiar los minerales nuevos que son claves para la manufactura y funcionamiento de estos artefactos y que se encuentran dispersos y son muy diversos, por ejemplo los minerales denominados tierras raras. Como se señalara antes, en el mundo más desarrollado el modelo energético digital actual sigue demandando cada vez más energía con respecto al final de la etapa inmediata anterior de la segunda revolución industrial, este resultado es explicado como parte de un comportamiento típico observado históricamente entre el PIB<sup>5</sup> y el consumo de energía, como lo ilustra la gráfica de la figura 1. Es muy significativa la fuerte linealidad correlacional observada entre PIB y consumo energético, que su representación gráfica es una línea recta casi perfecta, de modo que en los hechos, esta etapa o era digital actual es más energía-demandante que la etapa previa al final de la década de los años 1960.

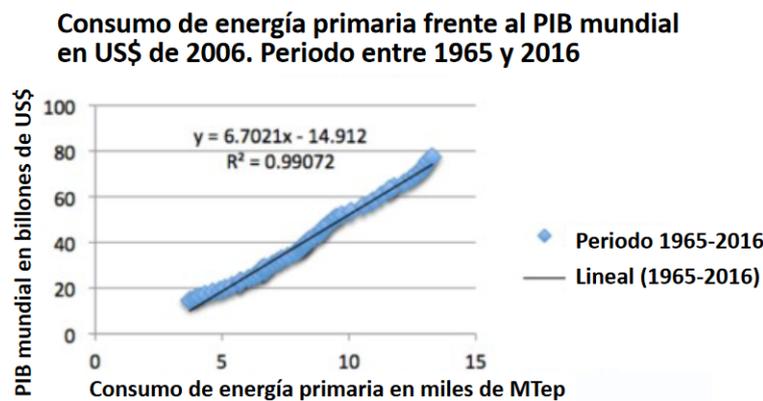
Luego, por simple comparación se puede notar que desde que era recolector-cazador (200 va-

<sup>4</sup>TIC: tecnologías de la información y de la comunicación

<sup>5</sup>PIB: producto interno bruto.

tios), hasta el final de la etapa de elevada industrialización, en torno al año 1960 (11.500 vatios); el humano ha aumentado su consumo energético per cápita llegando a multiplicarlo por 50. A esto hay que agregar la circunstancia del aumento de población que ha ocurrido simultáneamente. No obstante la fuerte globalización en que se encuentran las naciones del mundo actual, el consumo energético per cápita es significativamente distinto entre diferentes regiones geográficas. Entonces, a este respecto, lo que se puede es obtener un promedio de consumo mundial sin considerar tal hete-

rogeneidad por zonas de consumo. Para ese efecto, se parte de que el ritmo de consumo energético o potencia energética consumida mundial en el año 2019 fue aproximadamente 19 Teravatios y la población mundial fue, según [13] 7.770.521.000 habitantes, entonces, en una estimación conservadora, tomando el valor igual a 7.500.000.000 habitantes; dividiendo ambas cifras se obtiene el ritmo de consumo energético per cápita de toda la humanidad: 2.533 vatios/habitante en ese año, también representativo del actual año 2021.



**Figura 1.** Hay una fuerte correlación lineal entre PIB y consumo energético, [14].

Los recursos naturales son aquí abordados desde un enfoque múltiple que ha tomado en consideración la condición de ser fuente de energía aprovechada por el humano, o de ser material útil desde el punto de vista de su aprovechamiento tecnológico. Por otro lado se ha tenido en cuenta la naturaleza cíclica del recurso, abarcando todo el rango que va desde la condición no reciclable hasta la del ciclo totalmente cerrado. A continuación se describe brevemente los principales materiales que son considerados estratégicos por su incidencia en el metabolismo humano en un sentido amplio aunque someramente, y que abarca los recursos bioquímicos como los tecnológicos, adicionando a todos ellos el agua y el oxígeno.

### 3.1. Recursos naturales renovables

Bajo este título se abarca todo recurso que en los hechos son renovados en alguna fracción significativa desde el punto de vista de la sustentabilidad del metabolismo humano, sea de manera natural o por acción humana.

En una hora el Sol provee toda la energía que la humanidad consume en un año, [33]. Vale decir que por cada metro cuadrado de superficie del

planeta, en cada segundo de tiempo, llegan desde el Sol aproximadamente unos  $1353 \frac{J}{m^2 s}$ . Más que un simple recurso natural, esta energía es la causa que ocasiona el desarrollo de toda la dinámica vital en la Tierra. Como tal, causa la restauración al ritmo natural de sus respectivos ciclos, de los recursos materiales consumidos por la biosfera.

#### 3.1.1. Recursos naturales renovables no energéticos

##### Ciclo del oxígeno

El ciclo del oxígeno ( $O_2$ ) es la cadena de reacciones y procesos que describen la circulación del oxígeno en la biosfera terrestre. La reserva fundamental de oxígeno utilizable por los seres vivos es la atmósfera. El ciclo del oxígeno está estrechamente vinculado al ciclo del carbono pues el proceso por el que el carbono es asimilado por las plantas en el proceso de fotosíntesis, en el que también ocurre devolución del oxígeno a la atmósfera, en oposición al proceso de respiración, que ocasiona el efecto contrario.

Otra parte del ciclo natural del oxígeno que tiene un notable interés indirecto para los seres vivos de la superficie de la Tierra es el proceso de conversión de  $O_2$  en ozono:  $O_3$ . Las moléculas de

$O_2$ , activadas por radiaciones muy energéticas de onda corta, se rompen en átomos libres de oxígeno que reaccionan con otras moléculas de  $O_2$ , formando  $O_3$ . Esta reacción es reversible, de forma que el ozono, absorbiendo radiaciones ultravioletas vuelve a convertirse en  $O_2$ .

El oxígeno es el elemento más abundante en masa en la corteza terrestre y en los océanos, y el segundo en la atmósfera. En la corteza terrestre, la mayor parte del oxígeno se encuentra formando parte de silicatos y en los océanos, formando por parte de la molécula de agua ( $H_2O$ ). En la atmósfera se encuentra como oxígeno molecular ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y en menor proporción en otras moléculas como monóxido de carbono ( $CO$ ), ozono ( $O_3$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), monóxido de nitrógeno ( $NO$ ) o dióxido de azufre ( $SO_2$ ).

El  $O_2$  confiere carácter oxidante a la atmósfera. El mismo se forma por fotólisis<sup>6</sup> de  $H_2O$ , formándose  $H_2$  y  $O_2$ :  $2(H_2O) + 2h\nu \rightarrow O_2 + 2H_2$ .

El oxígeno molecular presente en la atmósfera y el disuelto en el agua intervienen en muchas reacciones de los seres vivos. En la respiración celular se reduce oxígeno para la producción de energía, generándose dióxido de carbono; en cambio en el proceso de fotosíntesis se origina oxígeno y glucosa a partir de agua, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y radiación solar absorbida.

El carácter oxidante del oxígeno causa que algunos elementos estén más o menos disponibles. La oxidación de sulfuros para dar sulfatos los hace más solubles al igual que la oxidación de iones amonio a nitratos. En otros casos disminuye la solubilidad de algunos elementos metálicos como el hierro al formarse óxidos insolubles.

El oxígeno es ligeramente soluble en agua, aumentando su solubilidad con la temperatura. Condiciona las propiedades redox de los sistemas acuáticos. Oxida materia bioorgánica dando el dióxido de carbono y agua. El dióxido de carbono también es ligeramente soluble en agua dando carbonatos; condiciona las propiedades ácido-base de los sistemas acuáticos. Una parte importante del dióxido de carbono atmosférico es captado por los océanos quedando en los fondos marinos como carbonato de calcio, [22].

#### Ciclo del agua

El 97,5 % del agua de la Tierra es salada. Más del 99 % del agua restante está contenida en depósitos subterráneos o en forma de hielo. Así que menos del 1 % del agua dulce se encuentra en lagos, ríos y otras formas superficiales y fáciles de

acceder. El agua que se encuentra en la superficie de la tierra circula rápidamente, pero la que se encuentra congelada a lo largo de las cuatro estaciones del año, la de las profundidades oceánicas y la de los depósitos subterráneos; esa masa de agua mucho mayor, circula lentamente.

El ciclo del agua es complejo, involucra cambios en el estado físico del agua y movimiento de la misma a través de los ecosistemas y entre ellos. Se ha llegado a estimar los tiempos de permanencia promedio de las moléculas de agua, en función del ambiente espacial por donde transcurre su ciclo, como se describe en la lista que sigue:

- Cuerpos de seres vivos: 1 semana.
- Atmósfera: 1,5 semanas.
- Ríos: 2 semanas.
- Geosfera más cercana a la corteza terrestre:
  - Pantanos: de 1 a 10 años.
  - Lagos: 10 años.
- Océanos y mares: 4000 años.
- Capas subterráneas: de 2 semanas a 10000 años.
- Glaciares y permafrosts: de 1000 a 10000 años.

El ciclo del agua es impulsado por la energía de origen radiante solar. El sol calienta la superficie del océano y de todo cuerpo de agua superficial. Esto causa que el agua líquida se evapore y que el hielo se sublime convirtiéndose directamente de sólido a gas. También esta energía origina circulaciones atmosféricas que transportan el vapor de agua hacia la atmósfera y mueven las nubes.

Estos procesos mueven el agua en la atmósfera. Con el tiempo, el vapor de agua en la atmósfera se condensa en nubes y luego cae como precipitación, en forma de lluvia o nieve. Cuando la precipitación llega a la superficie de la tierra: puede evaporarse de nuevo, o fluir sobre la superficie o percolarse, vale decir, filtrarse a través del suelo.

El agua en los niveles superiores del suelo puede ser absorbida por las raíces de las plantas. Estas usan una parte del agua para su propio metabolismo y el agua que se encuentra en sus tejidos puede pasar al cuerpo de los animales cuando estos comen planta. Sin embargo, la mayor parte del agua que entra en el cuerpo de la planta se pierde hacia la atmósfera por transpiración. El proceso de transpiración típicamente transcurre así: el agua penetra a las raíces, viaja hacia arriba por tubos

<sup>6</sup>Fotólisis del agua: ruptura de los enlaces químicos del agua por causa de energía radiante. Se llama fotólisis a la disociación de moléculas orgánicas complejas por efecto de la luz, y se define como la interacción de uno o más fotones con una molécula objetivo. La fotólisis del agua es la ruptura de la molécula de  $H_2O$  mediante el poder oxidante que posee el ión  $p680+$  rompe la molécula de  $H_2O$ , en 1  $e^-$  que es aceptado por la clorofila  $p680+$ , en 2 protones  $H+$  que son aceptados por la coenzima  $NADP$  para obtener  $NADPH_2$ , y  $O_2$  molecular que es liberado hacia la atmósfera renovándose periódicamente el mismo, [23].

vasculares formados por células muertas y se evapora a través de poros foliares llamados estomas.

El agua que se percola hacia el subsuelo se convierte en agua subterránea, a veces se deposita en lecho de roca. Esta agua subterránea puede encontrarse en poros entre partículas de arena y grava o en grietas de rocas, y constituye importantes depósitos de agua dulce. El agua subterránea poco profunda fluye lentamente a través de poros y fisuras, y puede aflorar en manantial, naciente de arroyo o lago, donde se convierte nuevamente en agua superficial.

La lluvia y el escurrimiento superficial del agua también produce circulación de varios elementos, entre estos el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre. En particular, el escurrimiento superficial impulsa estos elementos causando su movimiento a través de ecosistemas terrestres hacia ecosistemas acuáticos, [43].

Cuando la humedad del aire se combina con óxido de nitrógeno y dióxido de azufre, los cuales son provocados por fábricas, centrales eléctricas y automotores que queman carbón y aceite; se llega a formar la *lluvia ácida*. Al combinarse estos gases con el vapor de agua se forman ácido sulfúrico y ácido nítrico, que cuando caen a la tierra en forma de precipitación, causan daño a la vida.

Causas de la lluvia ácida:

- Quema de combustibles fósiles.
- Liberación de sulfuro en el ambiente por parte de las industrias.
- Emisiones de los automóviles que producen abundancia de óxido de nitrógeno en el aire.

Efectos de la lluvia ácida:

- Causa daños ambientales severos en los bosques y en los árboles.
- Daña los ecosistemas vitales.
- Algunos animales no pueden sobrevivir a este ácido y mueren.
- Daña la salud de los seres humanos, [44].

Tanto las aguas saladas en torno a los grandes centros y estuarios de los ríos (ejemplos en Noruega y Tailandia) como en los cuerpos de agua dulce (ejemplos el río Tiete a su paso por la ciudad Sao Paulo y el Granges en la India), se encuentran significativamente eutrofizados por acumulación de restos de fertilizantes provenientes de aguas servidas y de cultivos a gran escala.

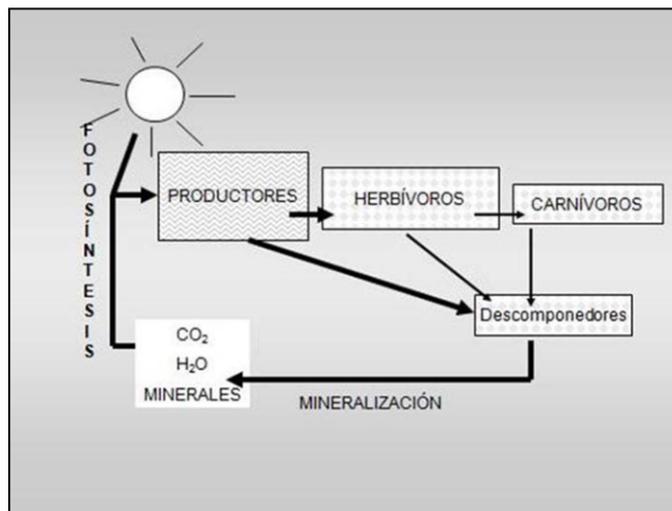
#### **Ciclos biogeoquímicos**

Bajo la denominación biogeoquímico se refiere a los nutrientes que necesitan las plantas y que los toman del aire y del suelo. Lógicamente, cabe esperar un significativo incremento de calidad y cantidad de los alimentos cultivados cuando el balance de nutrientes es el correcto y abarcante de todos sus componentes, en comparación con a la condición deficitaria de nutrientes del suelo. En efecto, si aún uno solo de los nutrientes necesarios fuere escaso; tanto el crecimiento de las plantas cuanto su rendimiento se ven reducidos, [27].

En los ecosistemas, cada nutriente posee su dinámica propia, moviéndose desde el ambiente a los organismos vivos, y desde estos de nuevo al ambiente, formando así lo que se denomina *ciclo biogeoquímico*. Los organismos autótrofos: las algas y las plantas verdes, son agentes cuya acción es esencial para la realización de la cadena trófica<sup>7</sup>, al producir ecosistema; vale decir, al tomar los nutrientes del ambiente: suelo compuestos inorgánicos y orgánicos contenidos en medios acuosos y en el aire; y al transformarlos en otros elementos orgánicos, que mediante esta transformación son asimilados por los organismos heterótrofos: el humano y demás animales herbívoros, carnívoros y descomponedores. Así, además de posibilitar cadenas alimentarias, los nutrientes las atraviesan y completan su ciclo con las excreciones, la orina, y la muerte y posterior descomposición de los organismos vivos; retornando al ambiente y quedando disponibles para ser aprovechados nuevamente, iniciando así un nuevo ciclo (Figura 2). El aprovechamiento de los nutrientes en los ecosistemas naturales es muy eficiente debido a la ocupación plena de los recursos, cuando hay participación humana es fundamental preservar los procesos naturales al diseñar el método de cultivo agrícola a ser practicado.

---

<sup>7</sup>Cadena trófica: sistema alimentario en cadena inter-especie, [24].



**Figura 2.** Esquema simplificado del ciclo de los nutrientes en un ecosistema natural, ([42])

Los ciclos de los nutrientes pueden ser clasificados en dos grupos: *gaseosos* y *sedimentarios*. En el primero, los nutrientes circulan principalmente entre la atmósfera y los organismos vivos, y pueden ser reciclados rápidamente, como es el caso del nitrógeno. Los nutrientes de ciclo sedimentario circulan entre la corteza terrestre (suelo y rocas), la hidrosfera y los organismos vivos. Estos nutrientes son reciclados lentamente, y en algunos casos pueden estar retenidos por miles de años en las rocas; el fósforo es un nutriente de ciclo sedimentario, [42].

A continuación se listan algunos de los recursos biogeoquímicos fundamentales para la nutrición de las plantas de consumo humano.

#### – Ciclo del carbono

El ciclo del carbono  $C$  es el sistema de transformaciones químicas de compuestos que contienen carbono en los intercambios entre biósfera, atmósfera, hidrosfera y litosfera. Es un ciclo biogeoquímico de gran importancia para la regulación del clima terrestre. Este ciclo involucra actividades básicas para el sostenimiento de la vida. El carbono es un componente esencial para los vegetales y animales. El carbono forma parte de compuestos como glucosa y carbohidratos necesarios para realizar procesos como la respiración. El carbono también interviene en la fotosíntesis bajo la forma de  $CO_2$  tal como se encuentra en la atmósfera.

La reserva fundamental de carbono, en moléculas de  $CO_2$  que los seres vivos puedan asimilar, es la atmósfera y la hidrosfera. Este gas está en la atmósfera en una concentración de más del 0,03% y cada año aproximadamente un 5% de esta reserva de  $CO_2$  se consume en el proceso de fotosíntesis, vale

decir, es como si todo el anhídrido carbónico se renueva en la atmósfera cada 20 años. La vuelta de  $CO_2$  a la atmósfera se hace cuando en la respiración de  $O_2$ , los seres vivos oxidan los alimentos produciendo  $CO_2$ . En el conjunto de la biosfera, la mayor parte de la respiración de oxígeno la hacen las raíces de las plantas y los organismos del suelo, constituyendo así la respiración animal la menor parte de la respiración total de  $O_2$ .

Los productos finales de la combustión del carbono son  $CO_2$  y vapor de agua. El equilibrio en la producción y consumo de cada uno de ellos por medio de la fotosíntesis hace posible la vida.

Los vegetales verdes que contienen clorofila toman el  $CO_2$  del aire y liberan oxígeno durante la fotosíntesis. Los vegetales además producen el material nutritivo que es de consumo indispensable de los organismos heterótrofos. Todas las plantas verdes de la Tierra, junto con el fitoplancton y las algas marinas ejecutan fotosíntesis diariamente.

En la medida en que los vegetales consumen  $CO_2$ , este es remplazado por medio de la respiración de los seres vivos, por la descomposición de la materia orgánica y como producto final de combustión del petróleo, hulla (carbón mineral), gasolina, etc. En el ciclo del carbono participan los seres vivos y muchos fenómenos naturales, entre ellos los incendios. Los seres vivos acuáticos consumen el  $CO_2$  del agua; la solubilidad de este gas en el agua es muy superior a la que presenta en el aire, [22].

#### – Ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno ( $N$ ) se compone de cada uno de los procesos biológicos y abióti-

cos en que se basa el suministro de este elemento a los seres vivos. Es uno de los ciclos biogeoquímicos importantes en que se basa el equilibrio dinámico de composición de la biosfera, [22].

En la Figura 3 se puede observar un esquema simplificado del ciclo del nitrógeno. La atmósfera es la principal reserva de este nutriente, con un 78 % de su volumen ocupado por este gas ( $N_2$ ). Sin embargo, a pesar de que las plantas están rodeadas de este elemento, son incapaces de aprovecharlo en su estado gaseoso, solo pueden hacerlo en su forma mineral como ión nitrato ( $NO_3^-$ ) o como amonio ( $NH_4^+$ ). La transformación del gas a su forma disponible es entonces un paso imprescindible. Este paso ocurre naturalmente por vía biológica o por vía inorgánica.

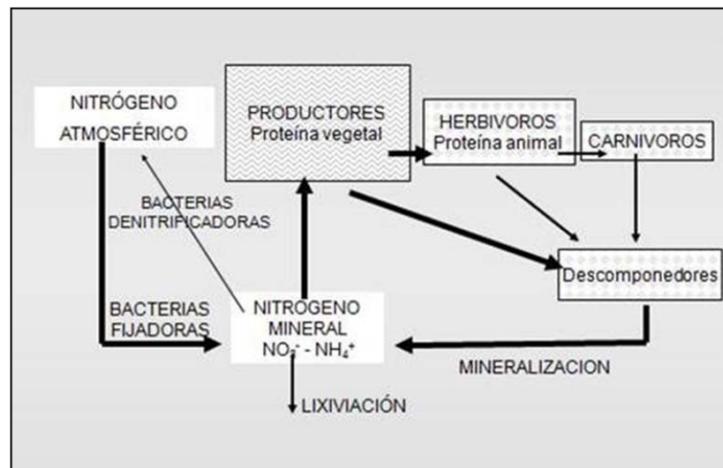
En el primer caso intervienen bacterias, las cuales pueden actuar libres o asociadas a plantas leguminosas (simbióticas), como las del género *Rizhobium*. Este es el mecanismo más importante con que se cuenta para incorporar  $N$  al suelo. La fijación inorgánica se realiza a través de los rayos, pero esta

forma puede representar sólo hasta 10 % de lo que puede ser fijado en forma biológica.

Las plantas toman nitrógeno del suelo y lo utilizan para formar sus proteínas. Los animales sólo pueden obtener nitrógeno orgánico, por lo cual, deben consumir plantas (herbívoros) u otros animales que consuman plantas (carnívoros), [42].

Los animales, que no oxidan nitrógeno, se deshacen del que tienen en exceso en forma de varios compuestos. Los acuáticos producen directamente amoníaco ( $NH_3$ ), que en disolución se convierte en ion amonio. Los terrestres producen urea, ( $NH_2$ ) $_2$  $CO$ , que es muy soluble y se concentra fácilmente en la orina; o compuestos nitrogenados insolubles como la guanina y el ácido úrico, que son purinas, y ésta es la forma común en aves e insectos, y genéricamente, en animales que no disponen de suministro garantizado de agua, [22].

Tanto animales como vegetales, cuando mueren son degradados por una serie de organismos descomponedores, librando nitrógeno al suelo. Parte de este nitrógeno puede ser aprovechado por las plantas.



**Figura 3.** Esquema simplificado del ciclo del nitrógeno en un ecosistema, ([42])

#### – Ciclo del fósforo

El fósforo ( $P$ ) es un componente esencial de los organismos. Forma parte de los ácidos nucleicos: ADN y ARN; del ATP y de otras moléculas que tienen  $PO_4^{3-}$  y que almacenan la energía química; de los fosfolípidos que forman las membranas celulares; y de los huesos y dientes de los animales. Se encuentra en pequeñas cantidades en plantas, en proporciones de un 0,2 %, aproximada-

mente. En los animales hasta el 1 % de su masa puede ser fósforo.

Su reserva fundamental en la naturaleza es la corteza terrestre. Por meteorización de las rocas o sacado por las cenizas volcánicas, queda disponible para que lo puedan tomar las plantas. Con facilidad es arrastrado por las aguas y llega al mar. Parte del que es arrastrado sedimenta en el fondo del mar y forma rocas que tardan millones de años en volver a emerger y liberar de nuevo las sa-

les de fósforo. Otra parte es absorbida por el plancton que, a su vez, es comido por organismos filtradores de plancton, como algunas especies de peces. Cuando estos peces son comidos por aves que tienen sus nidos en tierra, devuelven parte del fósforo en las heces (guano) a tierra.

Es el principal factor limitante en los ecosistemas acuáticos y en los lugares en los que las corrientes marinas suben del fondo, arrastrando fósforo del que se ha ido sedimentando, el plancton prolifera en la superficie. Al haber tanto alimento se multiplican los bancos de peces, formándose las grandes pesquerías del Gran Sol, costas occidentales de África y América del Sur y otras.

Con los compuestos de fósforo que se recogen directamente de los grandes depósitos acumulados en algunos lugares de la tierra se abonan los terrenos de cultivo.

#### – *Ciclo del Azufre*

El azufre ( $S$ ) forma parte de proteínas. Es componente esencial para el crecimiento de la planta. También está involucrado en la formación de la clorofila. Las plantas y otros productores primarios lo obtienen principalmente en su forma de ion sulfato ( $SO_4^{2-}$ ). Los organismos que ingieren estas plantas lo incorporan a las moléculas de proteína, y de esta forma pasa a los organismos del nivel trófico superior. Al morir los organismos, el azufre derivado de sus proteínas entra en el ciclo del azufre y llega a transformarse para que las plantas puedan utilizarlos de nuevo como ion sulfato.

Los intercambios de azufre, principalmente en su forma de dióxido de azufre ( $SO_2$ ), ocurren entre las comunidades acuáticas y terrestres de una manera, y de otra en la atmósfera, en las rocas y en los sedimentos oceánicos, en donde el azufre se encuentra almacenado. El  $SO_2$  atmosférico se disuelve en el agua de lluvia o se deposita en forma de vapor seco; el reciclaje local del azufre, principalmente en forma de ion sulfato, se lleva a cabo en ambos casos. Una parte del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), producido durante el reciclaje local del sulfuro, se oxida y forma  $SO_2$ , [22, 27].

### **3.1.2. Recursos naturales renovables energéticos**

Bajo esta clasificación se refiere aquí a los recursos que son fuentes de las energías denominadas renovables porque dependen de que el Sol siga radiando energía, pero abarcan espacios geográficos extensos que requieren la acción humana para

lograr efecto sumativo, concentrado y acomodado para su aprovechamiento. En su estado natural pueden encontrarse como energía radiante solar, viento, energía hidráulica, energía química de biomasa vegetal o animal, entre otras. Su impacto ambiental negativo suele ser considerable al tiempo de construir la estructura necesaria para su aprovechamiento, pero este impacto es mitigado a lo largo de la vida útil de dicha estructura.

#### *Energía eólica*

La energía eólica hace referencia a aquellas tecnologías y aplicaciones en que se aprovecha la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía mecánica o eléctrica. En función del modo de aprovechamiento deseado, hay dos tipos principales de máquinas que aprovechan la energía contenida en el viento: los molinos, que se utilizan fundamentalmente para bombeo mecánico de agua, y los aerogeneradores, equipos complejos especialmente diseñados para producir electricidad.

#### *Energía radiante solar*

Energía solar térmica: utiliza la parte infrarroja del espectro electromagnético de la energía del sol para producir calor. La transformación se realiza mediante colectores ópticos térmicos que absorben la energía radiada por el sol.

Energía solar fotovoltaica: utiliza el rango ultravioleta (en la celda de silicio) del espectro electromagnético de la radiación solar para producir electricidad. Se basa en el efecto fotoeléctrico, la transformación se realiza por medio de celdas fotovoltaicas. Cada celda se compone de dos semiconductores laminares sensibles a la luz solar, uno de ellos de tipo p, que colecta en su superficie carga positiva; y el otro, de tipo n, que colecta en su superficie cargas negativas. Cuando se juntan estos dos semiconductores laminares para formar la celda fotovoltaica, cada lámina alberga cargas de signo distinto, generándose así una diferencia de potencial entre las dos caras opuesta a la unión. Si se conectan estas caras opuestas de la celda a un circuito externo, la celda es capaz de proveer energía eléctrica al circuito. Conectando muchas celdas fotoeléctricas entre sí se puede obtener mayor potencia eléctrica, lo cual se logra a su vez multiplicando la cantidad de módulos o paneles solares fotovoltaicos.

#### *Energía de biomasa*

Se denomina biomasa a toda masa orgánica proveniente de plantas, animales y diversos residuos de actividades humanas. El concepto biomasa abarca variadas fuentes energéticas: desde leña quemada para calefacción hasta planta térmica para producir electricidad a partir de combustibles, residuos forestales, agrícolas, ganaderos e incluso cultivos energéticos, pasando por biogás de vertederos, lodos de depuradoras y biocombustibles.

Cualquier tipo de biomasa proviene de la reacción de la fotosíntesis vegetal, que sintetiza sustancias orgánicas a partir del  $CO_2$  del aire y de otras sustancias simples, aprovechando la energía del Sol.

Teniendo en cuenta su origen los biocombustibles forman parte de la biomasa. El término biocombustible comprende: bioetanol, biodiesel y biogás producidos a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial y desechos orgánicos.

Además de emplearse como combustibles para producir energía eléctrica, se los incorpora como complemento de combustibles convencionales.

El biogás es un fluido gaseoso que se obtiene de la descomposición de materia orgánica por proceso biológico de digestión anaeróbica en ambiente con carencia de oxígeno, por medio de bacterias específicas.

Genéricamente el biogás se refiere a la mezcla constituida por metano, de 55 % a 70 % y dióxido de carbono, con pequeñas proporciones de hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El porcentaje de metano lo caracteriza como combustible con poder calorífico apto para la combustión, [19].

Entre los recursos energéticos renovables, la leña es el más antiguamente disponible como fuente de calor, siendo además la más accesible, versátil y de fácil reproducción, de ahí su rol preponderante en la prehistoria y en la historia de la pervivencia humana.

#### *Fuentes hidroeléctricas*

Se entiende por tal, toda planta de conversión de energía cinética y potencial gravitatoria del agua, en energía mecánica que finalmente es transformada en energía eléctrica.

Entre las modernas fuentes de energía renovable, esta es la única que a más de un siglo de su descubrimiento, además de producir energía prácticamente libre de efectos y productos ambientales contaminantes, tiene una tasa de retorno claramente mayor que la unidad, la cual es creciente con la potencia instalada de la planta generadora, situándose el rango típico entre 1:10 y 1:100, respectivamente para plantas de entre 1 y 10 MW por un extremo, y plantas del orden de 100 MW por el otro. Para plantas de mayor potencia instalada y vida útil de al menos 100 años, la tasa de retorno puede llegar a superar el valor 1:100, [10]. Un factor decisivo y que depende ya de cada caso en particular, consiste en el costo del sistema de transmisión, tanto por sus dimensiones como por factores geográficos.

#### *Geotermia*

Se entiende por energía geotérmica la que aprovecha el calor extraído de la corteza terrestre para diverso uso, ejemplos: en procesos industriales

o agrícolas, o puede ser transformada en energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica a partir de la geotérmica se basa en el aprovechamiento del vapor generado naturalmente por la geosfera, en turbinas de vapor que alimentan un generador eléctrico, [18].

#### *Undimotriz y mareomotriz*

La energía undimotriz, denominada también olamotriz, es la energía mecánica que proviene del movimiento de las olas marinas. Son un fenómeno derivado del viento, que a su vez es causado por el calentamiento de origen solar que al ser desigual en distintos puntos geográficos, genera variación de densidad y movimiento de masas de aire atmosférico.

La energía mareomotriz, también denominada energía oceánica o marina, es la energía mecánica (potencial y cinética) gravitatoria generada a causa del movimiento ascendente y descendente de las mareas. La energía que genera la marea al subir y bajar se aprovecha mediante su turbinado conectado a generador de energía eléctrica alterna.

De acuerdo con datos estadísticos de la corporación British Petroleum correspondientes al año 2019, [16], la fracción de la matriz energética mundial proveída por las energías renovables se reparte como se muestra a continuación.

- Energía hidroeléctrica: 6,4 %.
- Energía eólica: 2,2 %.
- Energía solar (fotovoltaica y térmica): 1,1 %
- Energía de biocombustibles: 0,7 %
- Otras energías renovables (biomasa de consumo industrial, más undimotriz, más mareomotriz): 0,9 %
- Fracción del total de la matriz energética mundial debida a todas las energías renovables: 11,3

A estas cifras se suma la fracción de energía primaria proveniente de biomasa que es utilizada fuera de la industria en países menos desarrollados tecnológicamente, donde se la consume masivamente como leña para la cocción de los alimentos. Sumando todos los usos de la biomasa, de acuerdo con datos proveídos por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la fracción de la matriz energética mundial debido al uso de biomasa, correspondiente al año 2014 se cifra en 10,3 %, [17].

Al año 2017 ya se había talado más del 50 % de los bosques originarios y el ritmo de deforestación supera el 1 % anual de todos los bosques del planeta. La explotación de energía hidroeléctrica ha anegado, para el mismo año, más del 30 % de las grandes cuencas fluviales de todo el planeta;

en Europa este porcentaje ya se sitúa por encima de 80 %, entre los usos hidroeléctrico, agrícola y de consumo humano y animal, [17].

Con respecto a las energías renovables modernas (básicamente eólica y solar), la AIE pronosticó en su informe WEO<sup>8</sup> del año 2016 que para el año 2040 se espera que este tipo de energía renovable alcance el 5,8 % de contribución a la matriz de energía primaria total, [17].

### 3.2. Recursos naturales no renovables

Bajo esta denominación se abarca los recursos cuya disponibilidad está determinada por el devenir histórico de la Tierra como planeta sujeto a transformaciones a una escala temporal superior al tiempo de vida que lleva el homo sapiens en el planeta. Genéricamente, estos recursos se encuentran disponibles una sola vez, de tal manera que si se los quiere reutilizar es preciso reciclarlos mediante intervención humana.

#### 3.2.1. Recursos naturales no energéticos no renovables

En este trabajo, los recursos minerales denominados no energéticos no renovables, comprenden a los que carecen de ciclos más o menos caracterizados de restitución, quedando a responsabilidad del humano el trabajo de volver cíclico su uso, maximizando la fracción recuperada en cada vez, ya que es físicamente imposible alcanzar el reciclaje pleno, esto es, al 100 %. Se excluye de esta categoría los ya tratados recursos biogeoquímicos, cuyo reciclaje natural, aunque imperfecto, ha probado ser satisfactorio siempre que su consumo se mantenga por debajo de los límites de reposición y no altere el cierre de tales ciclos.

Entonces, resta enfocar el tratamiento en los recursos materiales sin incluir el agua, el oxígeno, los fertilizantes y demás nutrientes; por ejemplo, el material de consumo en el servicio eléctrico, en la electrónica moderna y otras industrias de vanguardia, y en el transporte, entre otros rubros.

Si se denotara por  $\eta$  la razón de restitución del recurso, para todo recurso no renovable pero reciclable, naturalmente rige la condición de que  $0 \leq \eta < 1$ , siendo lo deseable lograr que  $\eta$  adquiera un valor  $\eta \rightarrow 1$ . El análisis del estado de agotamiento por recurso, mostrado en la figura 4, señala que al año 2007, los minerales más degradados eran, en orden decreciente: mercurio, con el 92 % de sus reservas extraídas, plata con el 79 %, oro 75 %, estaño 75 %, arsénico 75 %, antimonio 72 % y plomo 72 %. En el otro extremo se encuentran los recursos menos degradados, que resultan ser: cesio, torio, minerales del grupo del platino

(PGM), tántalo, aluminio, cobalto y niobio, habiéndose extraído menos del 20 % de las reservas mundiales.

Para estimar el estado de disponibilidad del recurso es necesario identificar variables claves para la estimación. En este contexto, en la literatura técnica se cuenta con un modelo propuesto que tiene en cuenta las siguientes variables:

- Cantidad: es necesario saber cuánto es la reserva global del recurso, la cual habrá de ir reduciéndose inexorablemente en virtud del segundo principio de la termodinámica.
- Composición: se refiere a la naturaleza fisicoquímica del recurso, que incide en la prece- dencia de utilidad relativa de acuerdo con su disponibilidad.
- Concentración: refleja la relación entre los volúmenes de la mena<sup>9</sup> y del recurso minado contenido en ella, vale decir, el volumen de material que se debe procesar por unidad de volumen del recurso extraído en su estado puro.

Una forma de abordar estas variables es por su equivalencia energética, vale decir, su costo en unidades de energía, ya que mientras se disponga de energía, es posible gastarla en pos de restituir el recurso a su estado útil original. Entonces, estas consideraciones posibilitan definir una variable que cuantifique el estado de disponibilidad del recurso natural de la siguiente manera:

*Medir la mínima cantidad de energía requerida para restituir un sistema (como por ejemplo un recurso mineral) a partir de su estado de degradación, hasta su estado útil original. Esta cantidad de energía sirve entonces como referencia del costo para restituir el estado de disponibilidad deseado.*

El método descrito precedentemente fue tomado de [25]. En él se asume como estado de degradación del recurso, la situación extrema en que el recurso ya se ha mezclado y dispersado con el resto de materia de que se compone el ambiente geográfico de consumo del recurso. Para el efecto de estimar el costo de restitución del recurso, se asume como estado útil de disponibilidad original o estado de reserva base, el estado en que se encontraba el recurso natural a principios del siglo XX.

Al basarse en el costo energético, este método de estimación es amplio, vale decir, es de validez genérica y posee propiedad aditiva; lo cual posibilita agregar y desagregar la contabilización de todo tipo de sustancias (como por ejemplo nitrógeno y hierro), puesto que toma en cuenta; y posibilita extender la aplicación del modelo de Hubbert.

<sup>8</sup>WEO: world energy outlook.

<sup>9</sup>Mena: Mineral del que se extrae un metal, tal y como se encuentra en el yacimiento, [54].

Este modelo recibe su nombre de su autor: Marion King Hubbert, geofísico estadounidense que en 1956 formuló acertadamente la predicción de que a principio de la década de los años 70 del siglo XX, el petróleo crudo de producción nacional de ese país llegaría a su cima de explotación, a partir de la cual esta decaería monótona y definitivamente, [11,12]. A partir de entonces, el modelo es utilizado tradicionalmente para estimar el pico de producción de combustibles y genéricamente, de todo recurso natural no energético, puesto que incorpora información sobre la cantidad de mineral extraída, y también sobre la calidad (concentración) del depósito mineral de donde se lo extrae.

Se dispone de una estimación del grado de agotamiento de los 51 principales recursos minerales no energéticos. Los datos fueron tomados de las fuentes US Geological Survey, y British Petroleum. De acuerdo con la fuente consultada, la estimación fue calculada como el cociente entre la cantidad extraída de mineral hasta el año 2007, y el total de reservas del recurso mineral que había a principios del siglo XX, ambas expresadas en términos energéticos, [25]. El resultado obtenido se

muestra en la gráfica de la figura 4. Solo en los 100 últimos años, se ha llegado a degradar el 26 % de las reservas agregadas de estos principales recursos minerales de uso industrial. También se ha extrapolado la curva de consumo en función del tiempo para averiguar cómo sería su progresión, teniendo en cuenta que la misma ha tenido un comportamiento cuasi-exponencial creciente. El resultado obtenido muestra que con referencia a las reservas que se estima habían a principios del siglo XX, desde un criterio conservador en cuanto a las cifras, asumiendo valores mínimos, y asumiendo que no se encontrarán nuevas minas que explotar, entonces tomaría 191 años consumir toda la reserva de minerales en su conjunto, con escenario de consumo siempre creciente. Evidentemente, esta evolución hipotética es solo a los efectos didácticos de llamar la atención sobre la necesidad de abandonar la cultura y la práctica del consumo siempre creciente reflejada en la forma cuasi-exponencial de su curva, ya que aún si se encontraran nuevos yacimientos del recurso, el crecimiento exponencial del consumo prevalecerá y agotará muy rápido todo incremento adicional de la reserva.

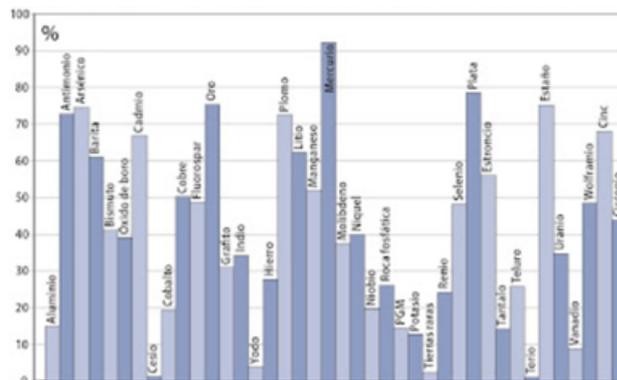


Figura 4. Agotamiento porcentual de los principales minerales no energéticos, ([25])

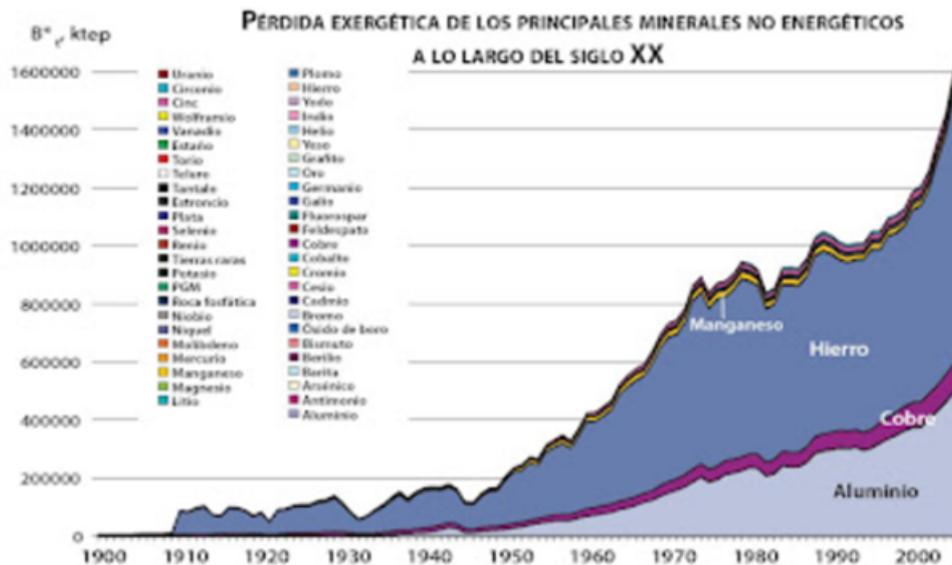
De acuerdo con los resultados del costo medido en unidades de energía de reposición de los minerales extraídos hasta la actualidad, para restituirlos a su estado original de inicios del siglo XX, dicho costo equivale como mínimo a 51 Gtep<sup>10</sup>. Esto significa que si se tuviera que reponer con tecnología actual todo el mineral extraído durante el siglo XX, sería mínimamente necesario gastar la tercera parte de todas las reservas de petróleo mundiales, reservas que suman 178 Gtep, según la corporación petrolera British Petroleum [25]. En la figura 5 se muestra la forma de la curva de con-

sumo en Ktep<sup>11</sup> de los principales recursos minerales no energéticos terrestres, en ella se nota claramente la progresión cuasi-exponencial creciente de las curvas, lo cual es claramente insostenible en un planeta finito como la Tierra.

En la misma figura se observa que sólo tres minerales son causantes de la mayor degradación en términos energéticos de los recursos naturales minerales no energéticos de la Tierra. Estos son: hierro, con 63 % del total, seguido de aluminio, con 24 %, y cobre, con 6 %.

<sup>10</sup>Gtep: Gigatonelada de petróleo equivalente, igual a la energía equivalente a la proveída por mil millones de toneladas de petróleo

<sup>11</sup>Ktep: kilotonelada de petróleo equivalente, igual a la energía equivalente a la proveída por mil toneladas de petróleo



**Figura 5.** Pérdida medida en unidades Ktep de energía, por degradación de principales minerales de la industria, ([25])

**Tierras raras** Entre los minerales no energéticos no renovables, los denominados tierras raras se están constituyendo cada vez más en rubros estratégicos por su función insustituible en la industria moderna. La denominación “tierras raras” se debe a su estado de relativa dispersión por la corteza terrestre.

Se incluye dentro de esa denominación al conjunto de 17 elementos químicos: escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de los lantánidos (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometeo, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio). El escandio y el itrio son incluidos entre las tierras raras debido a que aparecen frecuentemente mezclados con los lantánidos en los mismos yacimientos.

La producción mundial de óxidos de tierras raras es del orden de 160.000 toneladas/año de las que el 95% proceden de China y las reservas de tierras raras se cifran entre 80 y 120 Mt<sup>12</sup>, [20,21]. No obstante la gran reserva disponible, su extracción y separación es un proceso muy demandante de energía debido a su baja ley de mina<sup>13</sup>.

#### **Perspectiva de minerales no energéticos**

Hoy en día el ser humano utiliza 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. Por ejemplo, el indio (In), utilizado en pantallas planas y en modernos paneles fotovoltaicos basados en la tecno-

logía más eficiente CIGS<sup>14</sup>, se extrae de los barros residuales de 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. Con todo ese gasto material sin embargo, en el año 2013 la producción se situó por debajo de una Megatonelada según el United States Geological Survey (USGS); y se espera que de aquí al 2030, la demanda mundial de este elemento aumente más de 8 veces y la de galio, 22 veces; [26].

A similares costos se enfrentan otros minerales incluyendo las tierras raras como el neodimio y el disprosio, esenciales en la producción de imanes permanentes para aerogeneradores y motores eléctricos, y cuyo mercado depende casi totalmente de China.

En cuanto a lo que podría ocurrir en el futuro, se han hecho estimaciones y una proyección sobre el consumo de minerales basado en un modelo de desacoplamiento lineal en que se relaciona el consumo de metales per cápita y el PIB<sup>15</sup> de los países ricos (G6) y emergentes (BRICS)<sup>16</sup>. El resultado es que para el año 2050 se estima que el consumo de metales quintuple globalmente al actual y que la demanda de algunos de ellos: oro, plata, cobre, níquel, estaño, cinc, plomo y antimonio sea superior a las respectivas reservas actuales, [26].

<sup>12</sup>Mt: millón de toneladas

<sup>13</sup>Ley de mina: concentración en que se encuentra el mineral de interés en la mena

<sup>14</sup>CIGS: Cobre, Indio, Galio Selenio/Azufre).

<sup>15</sup>PIB: producto interno bruto.

<sup>16</sup>BRICS: Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica.

### 3.2.2. Recursos naturales energéticos no renovables

Bajo esta denominación se abarca a los recursos cuya disponibilidad, a igual que los recursos no energéticos no renovables, es determinada por el devenir histórico de la Tierra como planeta sujeto a transformaciones a una escala temporal superior al tiempo de vida que lleva el homo sapiens como tal. Estos recursos se encuentran disponibles una sola vez y es prácticamente imposible reciclarlos mediante intervención humana.

El consumo energético humano actual en la industria, el comercio, los servicios, el transporte y el hogar, proviene de fuentes distintas al Sol en cuanto fuente proveedora directa y sin intervención humana. Estudios recientes señalan que la suma de este consumo anual de energía, en el año 2019 ha llegado a 587 Exajulios ( $587 \times 10^{18}$  julios), [33]. Esto representa una potencia media equivalente de unos 19 Teravatios ( $19 \times 10^{12}$  vatios). Si se distribuye esta potencia media equivalente entre toda la población humana: asumiendo que hay 7.500 millones de personas, se obtiene una potencia per cápita igual a 2.533 vatios/habitante.

Según datos de la corporación British Petroleum (BP), citado por [16]; en el año 2019, el consumo de energía proveniente de recursos energéticos no renovables, colectivamente sumó 517,45 Exajulios ( $517,45 \times 10^{18}$  julios). Esta cantidad correspondió al 88,7% de la matriz energética mundial. La repartición por rubros energéticos no renovables estuvo conformada de la siguiente manera:

- Petróleo: 193,3 Exajulios  $\rightarrow$  33,1 %.
- Carbón mineral: 157,7 Exajulios  $\rightarrow$  27 %.
- Gas natural: 142 Exajulios  $\rightarrow$  24,3 %.
- Nuclear: 25,1 Exajulios  $\rightarrow$  4,3 %.
- Total correspondiente a recursos energéticos no renovables: 517,5 Exajulios  $\rightarrow$  88,6 %

#### Prevalencia del petróleo

El petróleo determina el estilo de vida moderna. Aún cuando la curva del consumo de petróleo ya muestra un incipiente declive, de acuerdo con datos de [51], prevalece su uso intensivo por carecerse de otra fuente tan densa y versátil en términos de energía y prestaciones:

1. Al año 2019, su consumo mundial da cuenta de entre el 31,1 y el 33,5% de la matriz energética global.

2. Es la fuente energética primaria de combustibles más versátil disponible.
3. Es la fuente por excelencia de insumos para la industria petroquímica, de la cual se extraen decenas de productos, entre ellos: plásticos, fibras textiles, barnices, pinturas, tintas, amoniaco, cera, goma, vaselina, asfalto, fertilizantes y productos para la industria alimentaria y papelera, de acuerdo con [50].
4. Es la fuente que suministra más del 90% de la energía del transporte mundial por agua, tierra y aire: de acuerdo con datos de la Agencia Internacional de la Energía, citada por [49]; en rigor, otras fuentes sitúan esta contribución al 95%, [17].
5. El precio de la energía de origen petrolífero presenta un significativo impacto en el precio de los alimentos. Los precios de alimentos de origen agrícola se correlacionan positivamente con toda variación de precio del petróleo, resultando en que el 67,17% de la variancia de precio de tales alimentos es explicada por la variación de precio del petróleo, como se afirma en [45].

De acuerdo con datos de la misma corporación (BP), del año 2015, citado por [48, 53], los combustibles de origen fósil, han alcanzado colectivamente su pico de máxima producción durante el segundo lustro de la década 2010-2020. En tal año, dicha fuente situó temporalmente tales máximos de producción de la siguiente manera:

- Petróleo: año de punto de máxima producción: 2005-2006 (crudo), 2015 (total), contribución a la matriz energética mundial: 32,6 %.
- Carbón: año de punto de máxima producción: 2015, contribución a la matriz energética mundial: 30,0 %.
- Gas natural: año de punto de máxima producción: 2020, contribución a la matriz energética mundial: 23,7 %.
- Uranio: año de punto de máxima producción: 2012, contribución a la matriz energética mundial: 4,4 %.

Tal resumen se refleja en la figura 6 donde se visualizan las tendencias de las curvas de producción, mostrando claramente lo insostenible del ascenso cuasi-exponencial.

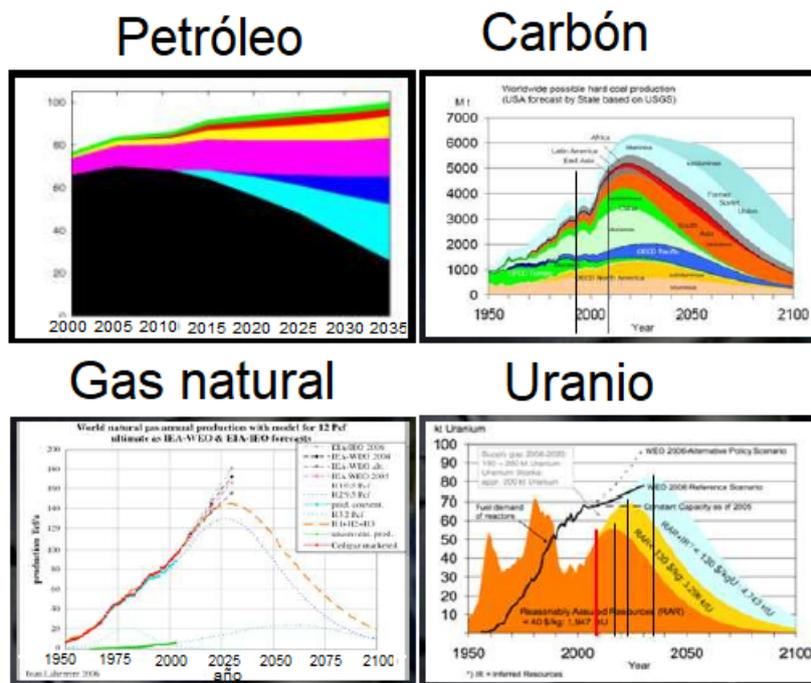


Figura 6. Situación de fuentes de energía no renovable, año 2015 según BP ([53]).

**Petróleo** El petróleo es un aceite mineral de color muy oscuro o negro, es menos denso que el agua y de un olor acre característico. Es formado por una mezcla de hidrocarburos acompañados de azufre, oxígeno y nitrógeno en cantidades variables. El petróleo se encuentra sólo en las rocas sedimentarias.

El petróleo se habría originado a partir de materia prima conformada fundamentalmente por restos de organismos vivos acuáticos, vegetales y animales que vivían en mares, lagunas, desembocaduras de ríos y en cercanías del mar. Estos restos, una vez en los fondos fangosos habrían sido atacados por bacterias anaerobias que consumieron su oxígeno dejando únicamente moléculas de carbono e hidrógeno denominadas hidrocarburos.

La presión ejercida por la enorme masa de sedimentos habría expulsado el líquido que se encontraba entre las capas de la roca sedimentaria. Este líquido, petróleo, se habría movido siguiendo pendientes a decenas de kilómetros hasta encontrarse con alguna roca porosa e impermeable cuyos huecos rellena. Esta roca se denomina roca almacén.

El petróleo crudo es una mezcla de hidrocarburos desde el más sencillo, el metano ( $CH_4$ ), hasta especies complejas con 40 átomos de carbono. Tal como mana del pozo, el petróleo tiene muy pocas aplicaciones; para obtener sus diversos derivados es necesario someterlo a un proceso de refinación, cuya operación principal es la destilación fraccionada. A distintas temperaturas, durante este proceso de destilación se obtiene una gama de productos comerciales a partir del petróleo bruto. Estas sus-

tancias pueden ser gaseosas tales como metano, etano, propano y butano; líquidas tales como gasolinas, queroseno y fuelóleo; y sólidas tales como parafinas y alquitranes.

Los principales usos del petróleo son como:

1. Combustible doméstico e industrial.
2. Carburante y lubricante.
3. Materia prima básica en la industria petroquímica.

Para satisfacer las requerimientos del mercado ha sido necesario desarrollar técnicas de transformación, que modificando la estructura de los productos obtenidos en la destilación fraccionada, posibiliten obtener las sustancias demandada. Entre esas técnicas, las más importantes son el craqueo y la polimerización.

En la operación de craqueo se logra romper una molécula pesada con muchos átomos de carbono, como el fuelóleo por ejemplo, originando varias moléculas ligeras, como gasolinas y gases, por ejemplo.

La polimerización es la unión de varias moléculas de un compuesto simple llamado monómero, por ejemplo el etileno, para formar una molécula más compleja llamada polímero, por ejemplo el polietileno. Este proceso es de gran importancia en la industria petroquímica.

El 60 % de los productos químicos que se encuentran en el mercado y el 80 % del sector orgánico proceden de la petroquímica, [7].

### Carbón mineral

El carbón es un combustible fósil, producto de una serie de transformaciones a partir de restos vegetales acumulados en lugares pantanosos, lagunas y deltas fluviales, principalmente durante el período carbonífero de la Era primaria.

Por medio de varias acciones químicas y variaciones de presión y temperatura durante de grandes intervalos de tiempo, estos vegetales se han transformado en carbón mediante un proceso denominado carbonización. Tras la muerte y el depósito de los vegetales comenzó la acción de las bacterias anaerobias, sobre la celulosa y la lignina fundamentalmente.

Los cambios que dieron lugar a la transformación de madera en carbón son de dos tipos: químicos y estructurales. En los químicos se desprenden hidrógeno y oxígeno mientras la proporción de carbono aumenta. En algunos casos como en la antracita, el carbono llega a constituir casi todo el producto resultante. En los cambios estructurales, la estructura fibrosa de la madera se transforma en estructura microcristalina, diferente según la variedad de carbón formada, y su color cambia de pardo a negro.

Hay cuatro tipos de carbones diferentes, según clases de vegetal de las que proceden y sobre todo según la duración y las condiciones de presión y temperatura del proceso de carbonización. Estos son:

1. Antracita: es un carbón duro, totalmente carbonizado. Muy compacto y brillante. Con brillo nacarado y color negro.
2. Hulla: es un carbón duro, totalmente carbonizado. Color negro lustroso. Brillo nacarado a bandas brillantes y mates.
3. Lignito: negruzco. Es un carbón blando perteneciente (como la turba) a épocas posteriores al carbonífero, por lo que no ha sufrido el proceso de carbonización completo. Tiene aspecto de madera quemada y brillo a trozos.
4. Turba: es el más reciente de los carbones. Es blando, de color marrón, mate, ligero de peso y en él se observan todavía restos de plantas.

La potencia calorífica de estos carbones varía entre 8.370.000 y 29.295.000 julios por kilogramo, desde la antracita y la hulla hasta el lignito y la turba. Su humedad varía desde 3 % hasta 40 % y el contenido de sustancias volátiles puede variar desde 8 % hasta 50 %. Las principales impurezas son el azufre y el nitrógeno, que al quemarse el carbón son liberados en forma de  $SO_2$  y los óxidos de

nitrógeno  $NO_x$ <sup>17</sup>. Estos compuestos pueden unirse posteriormente al vapor de agua y producir las lluvias ácidas.

Las aplicaciones más importantes del carbón mineral son como:

1. Combustible doméstico e industrial.
2. Reductor en la siderurgia (metalurgia del acero).
3. Combustible en las centrales térmicas.

La antracita se utiliza fundamentalmente como combustible doméstico e industrial. La destilación seca de la hulla genera cuatro fracciones: amoníaco, alquitrán, gas natural y coque. Este último es duro, resistente y poroso, y se utiliza en la metalurgia del hierro y en la siderurgia. El lignito se emplea fundamentalmente en las centrales térmicas para obtener de él energía eléctrica. La turba se utiliza como combustible doméstico, [8].

#### Gas natural

De acuerdo con la teoría más ampliamente aceptada por investigadores científicos, tanto el gas como el petróleo se han formado hace millones de años. El proceso habría iniciado con la muerte y depósito en el fondo marino de plantas y animales principalmente microscópicos conocidos como fitoplancton y zooplancton respectivamente. Luego estos restos orgánicos habrían sido enterrados por sedimentos. Estas capas de sedimentos se habrían estado acumulando, originando un aumento de presión y temperatura que convirtió la materia orgánica en compuestos de hidrógeno y carbono denominados hidrocarburos, [9].

Es una mezcla de gases entre los que predomina el metano en proporción entre 75 % y 95 % del volumen total de la mezcla. El resto de los componentes típicamente consta de etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y argón.

Formas de uso del gas natural:

1. Combustible doméstico e industrial: tiene un gran poder calorífico. Su combustión es regulable y produce escasa contaminación. Incluso la producción de  $CO_2$  es solo un poco mayor que la mitad de la producida por los demás combustibles fósiles. Como materia prima en la industria petroquímica para obtener amoníaco, metanol, etileno, butadieno y propileno.
2. El desarrollo del empleo del gas natural se ha realizado con posterioridad al uso del petróleo. El gas natural que aparecía en casi todos los yacimientos petrolíferos se quemaba como un residuo más. A pesar de su

<sup>17</sup>  $NO_x$ : óxido nitroso ( $NO$ ) y óxido nítrico ( $NO_2$ )

enorme poder calorífico no se lo podía aprovechar por los grandes problemas que planteaban su almacenamiento y transporte, [6]. Actualmente estos problemas se han resuelto a través de la licuefacción del gas a  $-107^{\circ}\text{C}$  para su almacenamiento y transporte en contenedores criogénicos o buques-tanques criogénicos. Si el transporte puede hacerse por gasoducto, se evita el costo de licarlo y mantenerlo a tan baja temperatura, transportándose directamente en estado gaseoso por tuberías de acero.

La densidad energética del gas natural es 43.560.000 julios por kilogramo (J/kg) casi tanto como la de la gasolina (43.920.000J/kg), [5].

### Combustible nuclear

Es el material utilizado para la generación de energía nuclear. Se trata de un material susceptible de ser fisionado o fusionado según si su uso es la fisión nuclear o la fusión nuclear.

La fisión nuclear es un proceso en el que el núcleo se divide en dos (algunas veces incluso tres) núcleos más ligeros. También se emiten otras partículas, por ejemplo neutrones, y radiación electromagnética: rayos gamma. La fisión puede ocurrir espontáneamente pero lo más común es que sea inducida.

La reacción de fisión más común en un reactor nuclear es:

$$n + {}^{235}\text{U} \rightarrow X + Y + (0 - 8)n + \gamma + \text{exceso de energía.}$$

donde  $X$  e  $Y$  denotan los núcleos en los que se divide el uranio,  $n$  denota protón y  $\gamma$  denota fotón de radiación gamma. A los núcleos producidos en la reacción precedente se les llama fragmentos de fisión, por ejemplo:  ${}^{99}\text{Zr}$ ,  ${}^{99}\text{Mo}$ ,  ${}^{137}\text{Te}$ ,  ${}^{140}\text{Xe}$ , etc. y tienen masas que casi suman la masa del núcleo de uranio original. Se pueden liberar entre 0 y 8 neutrones.

La energía que se libera cuando un núcleo de  ${}^{235}\text{U}$  se fisiona vale aproximadamente 200 MeV<sup>18</sup>. Esta energía se reparte entre la energía cinética de los fragmentos de fisión: unos 167 MeV, y los neutrones: unos 5 MeV. Además, unos 17 MeV aproximadamente se liberan en las desintegraciones beta: unas tres desintegraciones por fragmento, en promedio. Los 7 MeV restantes se emiten como radiación gamma.

A efectos comparativos con otros recursos energéticos orgánicos, hay que recordar que la combustión de un único átomo de carbono produce solamente unos 4 eV de energía: ¡unas 50 millones de veces menos! Y la energía por molécula liberada en la explosión del TNT<sup>19</sup> es también

muy pequeña en comparación: unos 18 millones de veces menor, [2].

En vista de que aún es imposible construir reactor nuclear de fusión, al hablar de combustible nuclear, típicamente, como en este caso, se alude al combustible nuclear de fisión; tanto al material, como al conjunto elaborado con dicho material nuclear: barras de combustible, composiciones de material nuclear y moderador, o cualquier otra combinación.

El uranio es el combustible ampliamente dominante de los reactores actuales, seguido por el plutonio obtenido artificialmente como producto residual menor del reactor nuclear. En efecto, el combustible irradiado procedente de reactor nuclear está formado fundamentalmente por uranio en porcentaje cercano a 96 %, y plutonio en porcentaje algo inferior al 1 %. Actualmente los reactores nucleares en producción se emplean para generar energía eléctrica.

La energía calorífica producida en el reactor nuclear se utiliza para obtener vapor de agua e impulsar una turbina acoplada a un alternador. Esta es la forma de generar electricidad en la central nuclear.

Para que el reactor funcione, la masa del combustible nuclear presente en el reactor debe alcanzar la denominada *masa crítica*. La masa crítica es la cantidad necesaria para iniciar una reacción en cadena que es autosuficiente de manera estable.

Durante la fase de diseño de un reactor nuclear, también es necesario dejar espacio para las barras de control y los dispositivos de diagnóstico.

En teoría, la forma ideal sería la esférica, sin embargo, se usa una forma cilíndrica, obtenida por la combinación de un gran número de barras.

La fabricación del combustible destinado a las centrales nucleares demanda hacer un conjunto de operaciones necesarias que conforman un ciclo semi cerrado e incluye el tratamiento posterior del combustible gastado.

En el caso del uranio, el ciclo incluye:

1. Minería para extraer el uranio natural.
2. Producción de concentrados de uranio.
3. Enriquecimiento de uranio.
4. Fabricación de los elementos combustibles.
5. Uso del combustible en el reactor.
6. Reelaboración de los elementos combustibles irradiados, para recuperar el uranio remanente y el plutonio producido.

<sup>18</sup>Mev: unidad de energía equivalente a  $10^{-13}$  julios.

<sup>19</sup>TNT: sigla significa trinitrotolueno, sustancia explosiva de gran potencia. Este compuesto químico, que forma parte de los hidrocarburos de tipo aromático, deriva de la nitración del tolueno, [1].

A diferencia del combustible tradicional, por ejemplo, combustible fósil, el consumo de combustible en un reactor nuclear es muy lento. Una vez cargado en el reactor, generalmente dura años. Así también las operaciones de recarga de combustible son considerablemente más complejas.

El producto de la reacción, la escoria, permanece principalmente dentro de las propias barras o en elementos inmediatamente adyacentes.

Con el tiempo, las barras de combustible se vuelven cada vez más pobres en material fisiónable, cuando alcanzan el punto en el que ya no es eficiente explotarlas, deben reemplazarse. Dependiendo de la geometría del reactor, puede ocurrir que una parte del combustible se agote más rápido que otras: por lo general, la parte central se agota más rápido que la parte externa. La configuración de la barra es útil en este caso porque posibilita el reemplazo sólo de las partes más agotadas.

Las barras agotadas, así como el material en las inmediaciones, se vuelven altamente radiactivas debido a la presencia de productos de fisión generados por las reacciones, así como a algún otro material que puede activarse durante el proceso de captura de neutrones o como resultado de otros procesos similares. Por ende, la eliminación de barras agotadas es la parte más compleja del desmantelamiento de la escoria del reactor nuclear, [3, 4].

## 4. Conclusión

Toda forma de vida implica dinámica a nivel celular, entendida la célula como la base que define la especie viviente a través del ADN contenido en el cromosoma celular. En cambio la materia inerte naturalmente se encuentra estructurada solo hasta el nivel molecular, inferior en tamaño y complejidad con respecto a la estructura celular. Entonces, para que pueda haber vida hace falta construir a partir de átomos y moléculas, el tejido celular que conforma todo organismo viviente, vale decir, hace falta trabajo, como también hace falta para mantener la vida del espécimen viviente. Esta condición supone un estado de consumo permanente de energía, en contraposición con el estado de quietud total y permanente del tejido celular que implica directamente su muerte. En síntesis *vivir implica consumir energía*; es ahí donde aflora en toda su magnitud la función vital de los recursos energéticos en la vida humana, cabalmente esa misma función de la energía es extensiva a toda forma posible de desarrollo tecnológico, en el sentido de que todo proceso industrial consume energía, tanto más cuanto más complejo sea el proceso, porque el trabajo mismo es energía en tránsito desde alguna forma energética potencial hacia energía mecánica. Por lo tanto queda cla-

ro que sin energía no hay trabajo ni tecnología y ni siquiera hay vida, o en otros términos, tanto el trabajo exosomático como el endosomático, respectivamente, imponen como condición *sine qua non* el consumo de energía.

La energía es reconocida por su impacto sobre la materia. En los fenómenos vitales y tecnológicos, como en todo fenómeno natural, la materia es dual con la energía: los cuerpos son materiales, sean estos cuerpos vivos o estructuras tecnológicas inertes. En este trabajo se pretendió responder a interrogantes como la siguiente: ¿qué tan sustentable es el modelo metabólico humano actual, a la luz de la disponibilidad de recursos naturales materiales y energéticos, y en función de su tasa de renovabilidad? Y coronando el análisis hecho, avanzar un poco más, a la luz de los resultados encontrados, hacia la respuesta de esta otra interrogante ¿qué pautas pueden ser aprendidas, que puedan ser útiles al tiempo de construir un modelo metabólico material energético de los recursos naturales, que sea sustentable a lo largo del tiempo? A continuación se hace una interpretación de las incidencias de los diversos recursos considerados, tomados separadamente.

### 4.1. Implicancias de la situación de disponibilidad de recursos naturales biogeoquímicos

Los ciclos biogeoquímicos son procesos naturales que reciclan elementos de diversas formas químicas desde el ambiente hacia los organismos, y luego a la inversa. Entre los ciclos más directamente condicionantes de la vida humana se encuentran los del agua, del carbono, del oxígeno, del nitrógeno y del fósforo. En estos ciclos, se conectan los seres vivos a los elementos inertes de la Tierra, [44].

En su función productora de ecosistemas, los organismos autótrofos: las plantas verdes; toman los nutrientes del suelo y del aire; y lo transforman en elementos orgánicos, los cuales luego son consumidos por los organismos heterótrofos: los especímenes herbívoros, carnívoros y descomponedores. Así los nutrientes atraviesan los organismos, realizando y canalizando las cadenas alimentarias. Con las excreciones, la orina, luego la muerte y descomposición de los organismos vivos; los nutrientes retornan al ambiente quedando disponibles para ser aprovechados nuevamente por las plantas. El aprovechamiento de los nutrientes en los ecosistemas naturales es muy eficiente: en ellos ocurre una ocupación plena de los recursos, a través de procesos cíclicos que en el estado natural de los ecosistemas son ciclos cerrados.

La intervención humana con la irrupción de la agricultura ha significado un hito marcante en la transformación de los ecosistemas naturales. Pri-

mero porque ha supuesto un desequilibrio de la biodiversidad a favor de cultivos de variedades de interés, con el consecuente favorecimiento de la aparición de parásitos ante la abundante disponibilidad del alimento cultivado; en sus comienzos este factor era insignificante, pero con el correr del tiempo ha venido intensificándose, máxime con la práctica de monocultivos a gran escala, demandando el uso de insecticidas y herbicidas contaminantes del ambiente. Otro efecto fue la evolución hacia el empobrecimiento de la nutrición humana, hasta entonces tan variada como era posible mediante la actividad recolectora. Pero quizás el más grave de los efectos sobrevino cuando gran parte de los alimentos cosechados, en lugar de ser consumidos dentro de los propios agroecosistemas, fueron progresivamente transportados y destinados a los mercados de centros urbanos que fueron ganando población. Esta práctica acabó por instalar un flujo continuo y sin retorno de los productos de cosecha desde los sembradíos hacia los centros urbanos de consumo, abriendo los ciclos biogeoquímicos hasta entonces cerrados y sustentables. En conclusión, los agroecosistemas modernos son sistemas abiertos en cuanto a los ciclos de los nutrientes, al tener un producto de cosecha que no retorna al suelo del lugar en que fuera cultivado. Por esta razón, dada la magnitud del daño hecho con los monocultivos propios de la llamada revolución verde, es necesario reponer en forma exponencialmente cociente los nutrientes para poder seguir cultivando. Claramente una dinámica insustentable a la luz del principio de conservación de la materia-energía.

En los sistemas agrícolas modernos, la reposición practicada esta basada casi exclusivamente en el uso de fuentes minerales: rocas y fertilizantes sintéticos. Por lo tanto, de continuar este modelo en el largo plazo, las fuentes de nutrientes serán cada vez más escasas, en tales sistemas se tendrá cada vez más dificultad para reponer los nutrientes del suelo, lo cual lleva a su agotamiento puesto que la mayoría de estos nutrientes se encontrarán dispersos en los océanos. Aunque el contenido total de los diversos nutrientes en el planeta prácticamente no varía, sí lo hace su concentración. El flujo actual de nutrientes produce su dilución; circunstancia que trae aparejada, además de importantes dificultades físicas, mayores costos energéticos y económicos para su recolección y reposición a los agroecosistemas, [42]. A esto hay que sumar la complejidad del funcionamiento de todo ecosistema en su estado natural, complejidad que involucra un delicado equilibrio en la interacción de nutrientes que por su variedad: los hay primarios y secundarios (ambos de igual importancia), escapa a la capacidad de gestión del modelo empresarial actual de carácter reactivo a los problemas, igno-

rando la precaución que recomienda evitar avanzar en la acción hasta tener mejor conocimiento de sus consecuencias. Claramente, también aquí se detecta una dinámica insustentable, en este caso en virtud del principio de entropía creciente.

A la síntesis precedente, se debe agregar otro factor de estrés sobre la disponibilidad de los recursos naturales estratégicos: el aumento constante de la población mundial, pues con él la extracción de nutrientes deberá seguir creciendo en el futuro. Fiel al patrón exponencial creciente del consumo histórico de estos recursos, también el patrón de crecimiento poblacional ha venido siguiendo una forma exponencial.

Si bien en la naturaleza los diversos compuestos orgánicos e inorgánicos circulaban de forma natural con intervención de los factores bióticos y abióticos, como producto de la acción humana se ha producido un desequilibrio en la naturaleza, que ha llevado al constante deterioro del ambiente, [44]. Surge así una recomendación a favor de *revaluar en vista del conocimiento científico actual, la práctica agrícola de la época inicial de la agricultura, cuando el hombre vivía mayoritariamente en el campo o en pequeñas aldeas, donde producía y extraía los alimentos cerca del lugar de consumo, retornando la materia servida, plenamente biodegradable, al suelo de de la zona de producción*. Obviamente, esta revaluación debería hacerse con asistencia de todo el bagaje de conocimiento científico antes ausente y que ahora se dispone, para corregir errores, pero también en busca de obtener el más beneficioso balance factible.

#### 4.2. Implicancias de la situación de disponibilidad de recursos naturales no energéticos

En razón de haberse discutido ya las implicancias de la situación de disponibilidad de los recursos biogeoquímicos, que caen dentro de esta categoría de recursos no energéticos, resta entonces abocarse aquí exclusivamente a interpretar argumentando sobre recursos típicamente empleados en tecnología.

De acuerdo con el primer principio de conservación de la masa-energía, estos recursos siempre están presentes a pesar de su consumo, sin embargo, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, los mismos se encuentran dispersos y mezclados con todo lo que hay doquiera sea donde se encuentren. Entonces esta dispersión demanda previa recolección para volver a usarlos, vale decir, se debe realizar trabajo. Sin embargo en virtud del segundo principio, con dicho trabajo nunca se logrará recuperar la totalidad del recurso originalmente usado, aunque puede llegarse a reciclar en un alto porcentaje que en algunos casos puede situarse por encima del 90%. La forma de

la curva de extracción y consumo de estos recursos a lo largo del tiempo, en primera aproximación se asemeja al patrón exponencial creciente, con interrupciones por factores externos a la voluntad humana. Si a esto se suma el factor poblacional también exponencialmente creciente (aparte de interrupciones que están por fuera de la voluntad humana); entonces independientemente del reciclaje practicado, el volumen de consumo seguirá demandando de la actividad minera de extracción de este tipo de recursos.

La actividad minera extractiva demanda un trabajo con maquinaria pesada altamente energía demandante. Y también este trabajo se encuentra sujeto al segundo principio de entropía creciente, pues según las minas se van explotando, el costo de extracción va aumentando por efecto de la llamada ley de mina, que expresa que la concentración del mineral de interés va disminuyendo exponencialmente según se avance en la extracción de la mena. Si se toma en consideración el avance tecnológico aplicado a la explotación minera, ciertamente se puede lograr ahorro energético, pero aún así, se ha llegado a observar que los avances en el ahorro de energía por mejora tecnológica, siguen una tendencia creciente de proyección aritmética, mientras que la tendencia de la demanda crece de forma geométrica, entonces, en términos genéricos, invariablemente el resultado es siempre un crecimiento de consumo del recurso que conduce inexorablemente al colapso.

La más llamativa observación crítica que en forma genérica puede formularse con respecto al consumo histórico de todo recurso limitado, es la *conducta humana contradictoria e incoherente, orientada al incremento ilimitado de consumo del recurso, en un sistema físicamente limitado como es el planeta Tierra*. Si bien podrían encontrarse numerosos contraejemplos, esta es claramente la orientación conductual dominante, más notable aún desde inicio del consumo tecnológico masivo del petróleo. A pesar de disponer de información, las generaciones humanas actuales se muestran poco proclives a encarar su análisis y condensar ese corpus de información en conocimiento inductivo, vale decir, un conocimiento que ensanche y transforme su modelo de realidad, para entonces generar el estado de consciencia coherente con los hechos reales, capaz de impulsar la conducta humana. De la observación del devenir conductual histórico, parece atinado inferir que el humano típicamente es más proclive a conformarse con el conocimiento deductivo, que lo alcanza inmediatamente por asociación-adaptación de la información absorbida, a patrones del modelo mental previamente construido a lo largo de toda la vida. Y cuando tal adaptación resulta más bien forzosa, el esfuerzo que presagia y pergeña ante la perspecti-

va de abandonar el modelo dentro del cual se ha generado el problema, parece atinado asumir que el humano se amilana y se limita a conjeturar que el problema ya está siendo atendido en alguna instancia jerárquica superior. Por lo demás, al sujeto construido en las generaciones humanas actuales le parece natural el modelo de metabolismo de recursos naturales en el cual ha nacido y adquirido consciencia, máxime siendo ese modelo el único que ha conocido.

El aprendizaje fruto de la reflexión sobre el problema del consumo exponencial creciente observado históricamente, aplicable a esta categoría de recursos no energéticos no renovables, pero que es extensible a las otras categorías, es la siguiente: *cambiar de manera urgente el modelo de consumo que tiende al crecimiento "ad infinitum", por otro orientado a la sustentabilidad en el tiempo*. Más que una recomendación, esta es una condición, pues es imposible crecer siempre en un planeta que es limitado, de hecho, de darse en él, cualquier crecimiento solo es posible al costo de acortar la disponibilidad del recurso para el futuro. El modelo metabólico de este tipo de recursos, orientado a la sustentabilidad a lo largo del tiempo suele denominarse "modelo circular", aunque en rigor y en virtud del principio de entropía monótonamente creciente, solo es posible un "modelo espiral" cuyo paso de achicamiento entre un ciclo y el que le sigue, sea lo más pequeño posible.

#### **4.3. Implicancias de la situación de disponibilidad de recursos naturales energéticos no renovables**

Los recursos energéticos son un prerequisite para todo trabajo, incluyendo los procesos vitales de los organismos vivos. La vida en la Tierra solo es posible debido a que el recurso energético solar ha permanecido disponible durante miles de millones de años; tiempo suficiente en que ha propiciado, engendrar, desarrollar y mantener organismos vivos. Esta es la explicación que se aprende a partir de observables reales junto con extrapolaciones temporales razonables de lo observado, vale decir, es la explicación científica para la presencia de la vida en el concierto universal. Desde esta realidad vital, todos los especímenes vivos de todas las especies constituyen, cada uno, una compleja maquinaria capaz de aparearse, reproducirse y mantenerse en estado dinámico que consiste en la permanente adaptación homeostática al ambiente. El humano, como ser heterótrofo, por una parte nutre su cuerpo consumiendo materia y energía obtenidas a partir de vegetales y de otras especies animales; pero por otra parte utiliza también materia y energía adicional a la que directamente nutre su cuerpo, para realizar actividades diversas como las industriales, de transporte

y de placer. Cabalmente, esta energía consumida en actividades distintas a su nutrición somática es la que obtiene de los recursos energéticos no renovables.

Sin embargo, resulta evidente como hecho histórico observable, que el humano ha emprendido una trayectoria errónea hacia la insostenibilidad de la vida de su propia especie, al venir introduciendo de manera creciente los recursos naturales energéticos no renovables en la producción fundamentalmente de alimentos. A consecuencia de este desatino histórico trascendental, el humano ha incurrido, quizás sin la suficiente advertencia al principio, en un peligro de gravedad vital, a saber: *la puesta de la vida de su especie bajo fuerte dependencia de recursos finitos no renovables que resultan ser de muy corta duración: entre dos y tres siglos, aproximadamente, al ritmo de consumo usual*. Claramente, la verdad de estos hechos constatados constituye un flagrante acto de falta de coherencia colectiva.

#### 4.4. Implicancias de la situación de disponibilidad de recursos naturales energéticos renovables

Por orden de edad de su explotación se encuentran se cuentan, en primer lugar la biomasa, por mucho, la más tradicional versátil y accesible: estimada entre 500 mil y un millón de años de uso; en segundo lugar la central hidroeléctrica, desde fines del siglo XIX; y últimamente los aerogeneradores y las plantas o huertos solares fotovoltaicos de gran porte, entre las más nombradas.

Ya para el año 2017 se había talado más del 50 % de los bosques originarios y el ritmo de deforestación supera el 1 % anual del conjunto de todos los bosques de la Tierra. Al mismo tiempo la explotación de energía hidroeléctrica ya ha anegado más del 30 % de las grandes cuencas fluviales de todo del mundo y en Europa este porcentaje de anegación ya ha cubierto más del 80 %, si se suman todos los usos: hidroeléctrico, agrícola y de consumo humano y animal.

Según pronóstico del año 2016 de la AIE, se espera que las energías renovables modernas (básicamente eólica y solar) alcancen el 5,8 % de contribución a la matriz de energía primaria total para el año 2040.

De acuerdo con [17]; los recursos energéticos renovables más significativos: viento, corriente de agua y Sol sólo producen energía esencialmente distribuida, muy adecuada para su uso local a pequeña escala. Para concentrar estas energías renovables se las debe convertir al vector electricidad; en el caso hidráulico mediante generación hidroeléctrica, en el caso eólico mediante aerogenerador y en el caso solar, mediante placa fotovoltaica. Pe-

ro la electricidad componía en el año 2017 solo el 18,1 % del consumo mundial de energía.

Según la misma fuente, cabe resaltar que las actividades humanas son básicamente no eléctricas, sin embargo, se espera que mediante concentración y electrificación, el conjunto de energías hidroeléctrica, eólica y fotovoltaica reemplacen algunos usos energéticos masivos actualmente proveídos por energías de origen fósil, por ejemplo aviación civil, transporte marítimo, agricultura mecanizada, transporte terrestre, personal y armamento militar. Para que estos recursos posibiliten efectuar dichos reemplazos, antes deben resolverse grandes problemas, entre los cuales el experto mencionado cita los siguientes:

- Intermitencias propias del sol, del viento y del agua; ciclos día/noche, viento/encalmada y ciclos estacionales.
- Los sistemas de almacenamiento masivo de energía requeridos, sea el bombeo inverso de agua de embalse a embalse o con baterías, muy costosas, para la muy poca capacidad que ofrecen y con ciclos de carga y descarga muy limitadas que las convierten rápidamente en chatarra muy contaminante. El almacenamiento masivo es algo que con los combustibles fósiles y el nuclear se tiene resuelto, si se dotan de las reservas suficientes en el punto de generación.
- El coste energético de tener que utilizar vectores energéticos, del que el más conocido es el hidrógeno, a partir de la electricidad que generan para servir determinadas funciones sociales no eléctricas.
- El coste de tener que desarrollar toda la infraestructura mundial de redes eléctricas y sus interconexiones y mallados para servir a la sociedad de forma 100 % eléctrica, lo que implicaría multiplicar entre 5 y 10 veces la infraestructura eléctrica mundial actual; y unas 15 veces la red eléctrica mundial actual si se tuviese que ofrecer el mínimo servicio imprescindible a más de 1.000 millones de humanos que no la tienen todavía, según el Banco Mundial, y a los otros mil millones que sólo la tienen para una deficitaria iluminación.
- Como consecuencia de todo lo anterior, la muy probable escasez mundial de muchos materiales críticos que hoy componen los aerogeneradores y las celdas fotovoltaicas, las baterías de almacenamiento, el sistema electrónico de conversión y los sistemas de transmisión y distribución de las redes eléctricas.

Un aprendizaje sintetizado a partir del análisis del estado de este rubro de recursos energéticos renovables refiere la falta de coherencia del discurso a favor de la descarbonización de la matriz energética mundial que actualmente demanda la quema masiva de hidrocarburos de origen fósil: se propone reemplazar los combustibles fósiles con recursos energéticos renovables, lo cual demanda una enorme infraestructura de generación de energías renovables que demandan gran variedad y cantidad de elementos químicos de la tabla periódica, los cuales solo pueden extraerse y refinarse mediante la quema a gran escala de combustible fósil, cabalmente lo que se quería evitar, es decir, bajo esta lógica se cae finalmente en una circularidad irresoluble.

Como ha puesto en evidencia, las esperanzas puestas en las fuentes de energías renovables son fútiles, debido a múltiple factores, el principal de ellos: las bajas tasas de retorno energético presentadas por estas fuentes. Si bien el Sol provee toda la energía necesaria para un año de consumo en aproximadamente una hora, esta energía llega a la tierra en forma radiante dispersa, lo cual en principio favorece su aprovechamiento local en pequeñas cantidades, en locales distribuidos por todo el mundo habitado; por sobre su aprovechamiento altamente concentrado.

#### 4.5. Consideraciones finales.

¿Qué implica todo hecho de falta de coherencia? Para encontrar una respuesta, conviene plantear las siguientes consideraciones: 1) la función de la razón es generar coherencia, 2) la razón es la facultad psíquica que engendra estado de consciencia, 3) el sistema lógico natural, vale decir la lógica científica, en virtud del principio de uniformidad de la realidad, rige por sobre todo sistema lógico instituido. Esto significa que, dado un contexto real, la lógica instituida debe adecuarse necesariamente a la lógica natural. Solo así se puede averiguar qué opciones se tienen disponibles para emprender alguna línea de acción conducente a resolver problemas reales.

La disquisición teórica formulada precedentemente, puede arrojar luz acerca de lo que se puede hacer en el escenario problemático actual. Luego, yendo en dirección regresiva; parece atinado proceder en este orden: 1) proveer elementos lógicos de la realidad contextual natural tales como datos, principios y leyes sobre la finitud, la irremplazabilidad, el ritmo de consumo y la duración de los recursos; 2) proveer elementos lógicos de la realidad contextual instituida tales como acciones políticas, mediáticas, financieras, legales y policiales conducentes a atender la lógica científica del contexto problemático real; 3) explicitar la relación causa efecto entre las causas reales instituidas y el efec-

to real deseado, orientando la explicitación hacia la fundamentación generadora de estado de consciencia. El proceso así desarrollado se constituye en instancia de la función racional generadora de coherencia.

Proveída en el párrafo precedente la fundamentación lógica, y proveídos en la sección precedente los resultados bajo la forma de datos, principios y leyes sobre la finitud, la irremplazabilidad, el ritmo de consumo y la duración de los recursos naturales energéticos no renovables. Se propone a continuación un breve ensayo de aplicación del enfoque racional a las circunstancias de la situación de descenso energético en que se encuentra la humanidad actualmente.

¿Qué observables hay, que pudieran servir para explicitar las implicancias derivadas de los hechos presentados en la sección precedente? Pasando revista a datos concretos sintetizados a partir de la disponibilidad de los recursos energéticos no renovables, como se ha visto, es ilustrativo empezar por recordar que el metabolismo somático basal del humano adulto consume aproximadamente 100 julios de energía en cada segundo de su vida, es una cantidad de energía que fluye a un ritmo equivalente al del consumo de una bombilla de luz de 100 vatios de potencia. A esta cantidad se encuentra ligada una condición, además de tener que respirar aire puro y beber agua potable a los ritmos definidos por las necesidades fisiológicas: la energía consumida ha de ser bajo la forma de nutrientes en proporción balanceada acorde a las necesidades del cuerpo humano. El humano además precisa cobijar su cuerpo, tanto con vestido como con albergue que le proporcione protección en todo tiempo contra rigores climáticos y otros peligros. Estos factores vitales asimilan al espécimen humano a un complejo sistema biofísico dinámico homeostático en torno a un estado de equilibrio descrito por variables en un espacio multidimensional. Entonces, cada punto en dicho espacio multidimensional representa el estado humano mediante valores estimados de variables de estado que califican las condiciones en que se encuentra el mismo en cuanto a nutrición, salud, edad, sexo, consumo energético y subjetivación, fundamentalmente. Cabalmente, aquí es donde los recursos energéticos influyen significativamente en la definición de la forma en que se gestionan las variables fundamentales mencionadas. Particular rigor debe tenerse con esta categoría de recursos que siendo no renovables, una vez consumidos se agotan para siempre.

Repasando datos proveídos en la sección anterior, durante el año 2019, de toda la energía exosomática consumida en todo el mundo, 517,5 Exajulios fueron extraídos de recursos energéticos no renovables, correspondiendo al 88,7 % del total

consumido por todos los humanos. El 95 % de todo el transporte mundial por tierra, agua y aire, depende solo del petróleo. Pero resulta que, cabalmente, la explotación de estos recursos tomados de forma colectiva entró ya en declive debido a su agotamiento, en algún punto temporal del lustro 2015-2028, muy probablemente en torno al tránsito del año 2018 al 2019. Llegados a este punto, amerita adelantar ya un dato con relación al tipo de recursos energéticos renovables a que es hace referencia en el siguiente apartado: si bien se habla mucho de las fuentes renovables de energía, la incidencia actual de estas fuentes se encuentra apenas cerca del 10 %, a pesar del esfuerzo por sostener la inversión a favor de su instalación y explotación, y aún al costo de aumentar el consumo de recursos fósiles no renovables, esta paradoja solo explica la baja tasa de retorno energético que presentan colectivamente las fuentes renovables, excepción hecha de la hidroeléctrica, entre las de nuevo cuño. En resumen: al tiempo presente se carece de sustituto para los principales componentes este tipo de recursos energéticos: los de origen fósil, es decir, petróleo, carbón mineral y gas natural.

Es urgente la necesidad humana de resolver la grave situación errónea en que se ha incurrido, a consecuencia de haber puesto la propia vida y la de toda la especie bajo fuerte dependencia de recursos finitos no renovables al tan corto plazo de unas diez generaciones. Resulta urgente desacoplar la sustentabilidad vital humana de los actuales recursos finitos no renovables.

En la confluencia de la vida con su sostén más determinante, la energía; se dispone de dos variables de trabajo que son estratégicas en cuanto se refieren directamente al humano, a saber: *población y consumo energético per cápita*, como se explicita a continuación.

Según se ha visto, se puede dividir la historia de la civilización del homo sapiens en seis etapas, conforme al modelo energético desarrollado: de recolección y caza, agrícola, agrícola avanzada, preindustrial, industrial e industrial avanzada. Las características de cada una de ellas han sido determinadas de forma significativa por las posibilidades disponibles conforme a los recursos energéticos de que dependían, [36]. Además, *siempre que se pasó de un modelo al siguiente, se ha logrado incrementar el consumo de energía per cápita así como el consumo energético global*. De hecho, este éxito en lograr consumir más energía para acceder a las bondades de la artesanía-tecnología ha sido siempre la causa de cambio de modelo.

Pero esta dinámica característica de la evolución gregaria de la especie, ha conducido al agotamiento de su causa sostenedora, iniciando así el descenso de consumo mundial de recursos energéticos no renovables. Siendo así, al presente

se desconoce recurso sustitutivo alguno que pudiera garantizar tan solo el mantenimiento del ritmo de consumo energético actual: por primera vez en su historia la humanidad enfrenta el dilema de migrar a algún modelo energético en que está obligada a consumir menos energía para pervivir. A primera vista, este escenario puede parecer un poco sorprendente, pero basta traer a colación el principio de conservación de la energía junto con el principio de la entropía creciente, cuyo mensaje es por demás claro: a cada proceso físico realizado, al menos una parte de la energía gastada se pierde de manera irrecuperable. Esta es la causa del agotamiento energético de las fuentes del limitado planeta Tierra.

Consumir menos energía significa reducir su potencia o ritmo de consumo, es aquí donde entran en consideración las dos variables claves mencionadas precedentemente: población y consumo per cápita; reducir cualquiera de ellas conlleva a una situación de conflicto inter-humano. Si de reducir la población se trata, se apunta contra el principio vital que expresa que el humano como ser vivo, promueve y defiende su vida y por ende, su vida colectiva. Ciertamente, ya la sola mención de esta posibilidad genera una sensación sumamente desagradable. Máxime cuando trae a colación toda esa secuencia interminable de luchas y guerras por territorio y sus recursos, que jalonan la historia de la humanidad.

Si de reducir el consumo energético per cápita se trata, se trata de socavar las condiciones sustentadoras del bienestar. Este es un fenómeno conduce a la confrontación intersubjetiva, y se manifiesta de manera creciente según se avanza en la dirección desde los menos privilegiados hacia los más privilegiados en el acceso a las comodidades tecnológicas y a otros privilegios económicos, habida cuenta que la cantidad de estos privilegios crece cada vez más rápido.

La exposición del escenario de descenso energético compulsorio, sumado a la breve revista de las etapas de civilización caracterizadas por el tipo de fuente de energía consumida, más las variables referidas a la población y al consumo energético en función de cada etapa; todo eso conduce a plantear una propuesta orientada a responder a la problemática descrita. En efecto, de la conjunción de los siguientes elementos

- avanzado estado de conocimiento de principios y leyes de la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas;
- conocimiento sobre disponibilidad de recursos energéticos en función de su renovabilidad y de la cima de su consumo recientemente alcanzada;

- conocimiento de la causa determinante del modelo histórico de civilización que ha experimentado la humanidad: las fuentes de energía;

surge la pregunta inspiradora: ¿Cuál es la combinación de modelo sustentable de explotación de recursos más conveniente a la luz de todo el abanico de posibilidades disponible?

Obviamente, responder adecuadamente esta pregunta, de por sí demanda al menos todo un trabajo de investigación exhaustiva que involucre, además de los recursos energéticos no renovables, todos los demás recursos accesibles; y muy especialmente, el cuidado de las condiciones de equilibrio ecológico del planeta. queda pues planteada la interrogante, como una cuestión planteada a raíz de los resultados de la dependencia vital humana de recursos energéticos de origen fósil que son finitos.

Paralelamente a la interrogante anterior, se agrega esta evidente condición: *Necesidad de tratamiento con rigor científico, del problema de la transición armónica desde el estado insustentable de población y consumo energético per cápita actual, hasta otro estado sustentable configurado con menor población y menor consumo energético per cápita, sujeto a la disponibilidad de recursos energéticos y al plazo de tiempo disponible.*

Según los resultados de población humana a lo largo de las etapas y modelos energéticos expresados en la sección anterior; en la etapa inmediata anterior al inicio del consumo significativo de los recursos energéticos no renovables, año 1750, la población mundial consistía de 750.000.000 habitantes, esa era la cantidad de humanos que conseguían sustentarse con recursos energéticos exclusivamente renovables. Por otro lado, el consumo energético humano, según se ha visto en la sección precedente, se situaba en aquel tiempo previo al consumo significativo de recursos energéticos no renovables, en 2.900 vatios. Asumiendo que en todas las regiones mundiales se consumía en promedio igual cantidad de energía por persona (esto obedece a un criterio conservador, si bien en rigor solo en las zonas urbanas más tecnológicas se consumían los 2.900 vatios por persona). Entonces, en el año 1750, se consumía energía bajo el modelo energético preindustrial imperante, al ritmo global igual al producto de la población multiplicada por el consumo energético per cápita de entonces:  $750,000,000 \times 2,900 = 2,175,000,000,000$  vatios =  $2,175 \times 10^{12}$  Teravatios. Sin embargo al año 2019, la población mundial ha llegado a unos 7.500.000.000, esto es, diez veces más que en el año 1750; y el consumo energético per cápita del año 2019 se situaba en torno a 2.533 vatios/habitante, promediado sobre toda la población mundial. Entonces, en el año 2019, se consumía energía bajo

los modelos energéticos en toda su diversidad presente en el presente: desde el digitalizado, próximo al modelo altamente industrializado aún presente, hasta el modelo agrícola, pasando por una pléthora de medios de vida que abarcan los de cinturones de pobreza de las grandes ciudades, caracterizados por su precariedad e improvisación. El ritmo de consumo energético global, igual al producto de la población multiplicada por el consumo energético per cápita del año 2019 es entonces:  $7,500,000,000 \times 2,533 = 18,999,997,500,000$  vatios  $\approx 19 \times 10^{12}$  Teravatios. Finalmente, comparando los resultados de ritmos de consumo energético mundial entre los años 1750:  $2,175 \times 10^{12}$  Teravatios y 2019:  $19 \times 10^{12}$  Teravatios, se concluye que dicho ritmo o potencia de consumo energético se ha multiplicado por 8,7, y esto tubo lugar en 269 años.

Este factor de incremento de consumo: 8,7 veces más, es en realidad mucho mayor, solo marca un valor umbral y se lo menciona para evidenciar lo grande que debe ser el aumento de consumo realmente experimentado; ante la carencia de datos sobre la distribución precisa de consumo energético por zona geográfica en el año 1750. Aún así, se puede afirmar que en tal año el consumo energético ocurría a un ritmo medio bastante inferior a los 2.900 vatios por persona, habida cuenta de que los grupos humanos vivían mayoritariamente en zonas rurales llevando estilos de vida marcados por la frugalidad en el consumo de energía exosomática.

Cabe afirmar que el aumento desaforado del consumo energético mundial a lo largo del intervalo de tiempo de 269 años es la causa última inexorable que ha conducido a la situación de recorte forzoso del consumo que se observa actualmente. Aún cuando la situación de descenso energético ha coincidido con el actual problema sanitario mundialmente presente, esta debe ser vista contingencia simplemente constituye un canal a través del cual ocurre el mencionado descenso que de todos modos estaba determinado por los principios y leyes naturales. Nótese en este sentido, el actual afloramiento de problemas relacionados al abastecimiento de ciertos rubros, como es últimamente anunciado en las crónicas de los medios de comunicación, ligado a problemas de su transporte. En efecto, desde fines del año 2018, la principal fuente energética, determinante del transporte: el petróleo, es consumido en cantidades decrecientes a partir de ese año, a pesar de los altibajos registrados, con tendencia inevitablemente hacia la baja de manera permanente.

Llegado a este punto, se propone tomar como referencia histórica, apuntar hacia un modelo de metabolismo que recuerda al de mediados del siglo XVIII, al cual se ha de sumar la aplicación racio-

nal de todo el bagaje de conocimiento científico acumulados desde entonces hasta el tiempo presente.

Como reflexión final se llama la atención sobre una paradoja: algunos autores la denominan la “maldición de los recursos naturales”, la cual afirma que una mayor abundancia de recursos naturales de un país tiene un impacto negativo sobre el PIB per cápita, lo cual plantea la hipótesis de cierto efecto negativo de los recursos naturales sobre la calidad de vida de la población local [15]. Esta paradoja, sin embargo, es dilucidada por algunos autores quienes interpretan la situación como producto de una injerencia de los centros de poder en asuntos de gobierno de los países poseedores de recursos naturales, para forzar la obtención de los recursos apetecidos, [25]. En este sentido, la gran empresa del futuro que aguarda ser encarada de frente es lograr la acción convergente de todos humanos en plano de equivalencia de sus vidas, una vez conquistada esta meta, sus frutos se habrán de multiplicar ilimitadamente.

## Referencias bibliográficas

- [1] Julián Pérez Porto y Ana Gardey. Definición de TNT. Definición.de, 2016, [en línea]. Obtenido el 21 de diciembre de 2021 de <https://definicion.de/tnt/>
- [2] NUPEX. Fisión nuclear. Nuclear Physics Experience, 2021, [en línea]. Obtenido el 21 de diciembre de 2021 de <http://www.nupecc.org/NUPEX/index.php?g=textcontent/nuclearenergy/fission&lang=es>
- [3] Oriol Planas. Combustible nuclear. Energía nuclear, 2020, [en línea]. Obtenido el 21 de diciembre de 2021 de <https://energia-nuclear.net/funcionamiento-central-nuclear/combustible-nuclear>
- [4] Oriol Planas. Plutonio: usos de sus isótopos y propiedades. Energía nuclear, 2021, [en línea]. Obtenido el 21 de diciembre de 2021 de <https://energia-nuclear.net/funcionamiento-central-nuclear/combustible-nuclear/plutonio>
- [5] Marcos Baeza. Coche Eléctrico. Los combustibles más energéticos. Bolgs de sociedad. El País, 2012, [en línea]. Obtenido el 19 de diciembre de 2021 de <https://blogs.elpais.com/coche-electrico/2012/12/los-combustibles-mas-energeticos.html>
- [6] Foro de la Industria Nuclear Española. ¿Qué es el petróleo, y qué usos tiene? Foro Nuclear, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 19 de diciembre de 2021 de [org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-gas-natural-y-que-usos-tiene/](https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-gas-natural-y-que-usos-tiene/)
- [7] Foro de la Industria Nuclear Española. ¿Qué es el gas natural, y qué usos tiene? Foro Nuclear, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 19 de diciembre de 2021 de <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-petroleo-y-que-usos-tiene/>
- [8] Foro de la Industria Nuclear Española. ¿Qué es el carbón, y qué usos tiene? Foro Nuclear, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 19 de diciembre de 2021 de <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-carbon-y-que-usos-tiene/>
- [9] PERUPETRO S.A. Conceptos básicos sobre el Gas Natural, 2010, [en línea] Obtenido el 19 de diciembre de 2021 de <https://www.perupetro.com.pe/wps/wcm/connect/984b352d-2ac3-4f97-815c-104617f8528f/Charla+Basica+sobre+GasNatural.pdf?MOD=AJPERES>
- [10] R.S. Atlason and R. Unnthorsson. Energy Return on Investment of Hydroelectric Power Generation Calculated Using a Standardised Methodology. Department of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science Hjardarhagi 6, 107, Reykjavik. University of Iceland, 2014, [en línea] Obtenido el 19 de diciembre de 2021 de [https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web\\_notes/Technology\\_Comparisons/EROI\\_Supporting\\_Files/Atalson%202015%20-%20EROI%20of%20hydroelectric%20-%20Elsevier%20preprint.pdf](https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Technology_Comparisons/EROI_Supporting_Files/Atalson%202015%20-%20EROI%20of%20hydroelectric%20-%20Elsevier%20preprint.pdf)
- [11] NAS. Marion King Hubbert. Member Directory. National Academy of Sciences, 2021, [en línea]. Obtenido el 18 de diciembre de 2021 de <http://www.nasonline.org/member-directory/deceased-members/54355.html>
- [12] Tyler Priest. Hubbert’s Peak: The Great Debate over the End of Oil. Historical Studies in the Natural Sciences, 2014. doi = 10.1525/hsns.2014.44.1.37
- [13] Colaboradores de Wikipedia. Población mundial. Wikipedia, 2021, [en línea]. Obtenido el 31 de octubre de 2021 de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Poblaci%C3%B3n\\_mundial&oldid=139374469](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Poblaci%C3%B3n_mundial&oldid=139374469)

- [14] Pedro A. Prieto. SOCIEDAD 100% RENOVABLE: ¿NOS ESTAMOS HACIENDO TRAMPAS AL SOLITARIO?. Jornada Energía Social. Goiener 5 años, 2018, [en línea]. Obtenido el 29 de octubre de 2021 de <https://www.goiener.com/wp-content/uploads/2018/11/D-PEDRO-PRIETO.pdf>
- [15] Carmen Jerónimo and Margorie Mendoza and Jean Paúcar. La maldición de los recursos naturales: análisis desde un modelo de regresión. Universidad de Lima, 2016, [en línea]. Obtenido el 29 de octubre de 2021 de [https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/9229/Jeronimo\\_Mendoza\\_Paucar.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/9229/Jeronimo_Mendoza_Paucar.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [16] Hannah Ritchie and Max Roser. Energy mix. Our World in Data, 2020, [en línea]. Obtenido el 25 de octubre de 2021 de <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [17] Pedro Prieto. EN LA ENCRUCIJADA ENTRE LAS ENERGÍAS FÓSILES Y LAS ENERGÍAS RENOVABLES. Dossieres EsF. Economistas sin fronteras, 2017, [en línea]. Obtenido el 25 de octubre de 2021 de <http://ecosfron.org/wp-content/uploads/Dossieres-EsF-24-La-energ%C3%ADa.pdf>
- [18] Ministerio de Economía. ¿Qué son las energías renovables? Gobierno de Argentina, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 25 de octubre de 2021 de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)
- [19] Jorge A. Hilbert. MANUAL PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. - Castelar, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 25 de octubre de 2021 de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)
- [20] Antonio Cerrillo y Alicia Valero. Nuestra civilización depende de minerales muy escasos en la naturaleza. La Vanguardia, 2021, [en línea]. Obtenido el 18 de octubre de 2021 de <https://www.lavanguardia.com/natural/energia/20210707/7579886/alicia-valero-china-apoderado-recursos-minerales-estrategico.html>
- [21] Manuel Regueiro and González-Barros. ¿Qué son las tierras raras? Tierra y Tecnología, 2019, [en línea]. Obtenido el 18 de octubre de 2021 de <https://www.icog.es/TyT/index.php/2019/05/que-son-las-tierras-raras/>
- [22] Flor Teresa García Huaman. CICLOS BIOGEOQUIMICOS, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 17 de octubre de 2021 de [https://www.estudiosecologistas.org/web/Curso/Curso%20Ecuador/Ciclos\\_Biogeogu%C3%ADmicos/Ciclos\\_Biogeogu%C3%ADmicos\\_2.pdf](https://www.estudiosecologistas.org/web/Curso/Curso%20Ecuador/Ciclos_Biogeogu%C3%ADmicos/Ciclos_Biogeogu%C3%ADmicos_2.pdf)
- [23] Ecured. Fotólisis. ¿En que consiste la fotólisis del agua?, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 17 de octubre de 2021 de <https://www.ecured.cu/Fot%C3%B3lisis>
- [24] Real Academia Española. Cadena trófica. Diccionario de la lengua española. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2014, [en línea]. Obtenido el 16 de octubre de 2021 de <https://dle.rae.es/cadena#DAiPTdK>
- [25] Alicia Valero and Antonio Valero. El agotamiento de la ‘gran mina Tierra’. El Ecologista, 2009, [en línea]. Obtenido el 18 de octubre de 2021 de <https://www.ecologistasenaccion.org/21247/el-agotamiento-de-la-gran-mina-tierra/>
- [26] Alicia Valero. Límites a la disponibilidad de minerales. El Ecologista, 2014, [en línea]. Obtenido el 18 de octubre de 2021 de [https://www.researchgate.net/publication/271828672\\_Limites\\_a\\_la\\_disponibilidad\\_de\\_minerales](https://www.researchgate.net/publication/271828672_Limites_a_la_disponibilidad_de_minerales)
- [27] FAO-IFA. Los fertilizantes y su uso, 2002, [en línea]. Obtenido el 17 de octubre de 2021 de <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- [28] Real Academia Española. Geosfera. Diccionario de la lengua española, 2014, [en línea]. Obtenido el 16 de octubre de 2021 de <https://dle.rae.es/geosfera?m=form>
- [29] Antonio Turiel. Entropía. The oil crash, 2012, Obtenido el 11 de octubre de 2021 de <https://crashoil.blogspot.com/2012/04/entropia.html>
- [30] Monica González. Conservación de la masa y la energía. Física. La Guía, 2010, [en línea]. Obtenido el 14 de octubre de 2021 de <https://fisica.laguia2000.com/energia/conservacion-de-la-masa-y-la-energia>
- [31] Andrew Rushby and Mark Claire and Hugh Osborne and Andrew Watson. UEA scientists reveal Earth’s habitable lifetime and investigate potential for alien life. Journal Astrobiology. University of East Anglia - American Association for the Advancement of Science (AAAS), 2013, [en línea]. Obtenido el 14 de octubre de 2021 de <https://www.eurekalert.org/news-releases/686720>

- [32] Concha Camarero Bullón. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN: CARACTERÍSTICAS, MODELOS Y FACTORES DE EQUILIBRIO. Universidad Autónoma de Madrid (UAM), 2002, [en línea]. Obtenido el 11 de octubre de 2021 de [https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/680602/EM\\_10\\_2.pdf?sequence=1](https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/680602/EM_10_2.pdf?sequence=1)
- [33] Antonio Turiel. Energía, entropía y exergía. The oil crash, 2021, [en línea]. Obtenido el 11 de octubre de 2021 de <https://crashoil.blogspot.com/2021/08/energia-entropia-y-exergia.html>
- [34] Ramón Roca. La descarbonización dispara el precio de los combustibles fósiles y encarece la transición energética a millones de hogares e industrias. El periódico de la Energía, 2021, [en línea]. Obtenido el 10 de octubre de 2021 de <https://elperiodicodelaenergia.com/la-descarbonizacion-dispara-el-precio-de-los-combustibles-fosiles-y-encarece-la-transicion-energetica-a-millones-de-hogares-e-industrias/>
- [35] Pedro A. Prieto. Las energías renovables: ¿Alternativas, paliativas o distractivas? ASPO-AEREN. Jornada, organizada por la Cátedra de Energías Renovables de la Universidad de Valladolid (UVa), en colaboración con la Junta de Castilla y León, 2008.
- [36] Roberto E. Cunningham. La energía, historia de sus fuentes y transformación. Petrotecnia, 2003, [en línea]. Obtenido el 10 de octubre de 2021 de <https://www.ier.unam.mx/~rbb/ERyS2013-1/Historia-Energia.pdf>
- [37] M. A. Rosales-Reynoso, C. I. Juárez-Vázquez y P. Barros-Núñez. Evolución y genómica del cerebro humano. Neurología, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2015.06.002>, [en línea]. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213485315001474>
- [38] Miguel Ángel Bonilla-García y Ana Delia López-Suárez. Ejemplificación del proceso metodológico de la teoría fundamentada. Cinta moebio, Santiago, n. 57, p. 305-315, 2016, [en línea]. Obtenido el 28 de septiembre de 2021 de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-554X2016000300006](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-554X2016000300006) doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-554X2016000300006>
- [39] Hécate Vergopoulos. La experiencia turística: ¿una experiencia de los ámbitos de experiencia turística?. Via Tourism Review, c. 2016, [en línea]. Obtenido el 26 de septiembre de 2021 de <https://journals.openedition.org/viatourism/1357>
- [40] José Miguel Balcera Barrero. La importancia de las emociones en la actividad turística. Andalucía Lab, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 26 de septiembre de 2021 de <https://www.andalucialab.org/blog/la-importancia-de-las-emociones-en-la-actividad-turistica/>
- [41] UNWTO. Glosario de términos de turismo. World Tourism Organization, 2021, [en línea]. Obtenido el 26 de septiembre de 2021 de <https://www.unwto.org/es/glosario-terminos-turisticos>
- [42] Esteban A. Abbona y Santiago J. Sarandón. Agroecología. Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. Sarandón, S.J. y C.C. Flores. Universidad Nacional de La Plata. 2014, [en línea]. Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/1630/mod\\_resource/content/3/Capitulo%208%20Nutrientes.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/1630/mod_resource/content/3/Capitulo%208%20Nutrientes.pdf)
- [43] Khan Academy. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS Y ACCIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL HOMBRE EN LA NATURALEZA. El ciclo del agua. Khan Academy, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-water-cycle>
- [44] 3º Medio Plan Diferenciado. Biología electivo. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS Y ACCIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL HOMBRE EN LA NATURALEZA. INSTITUTO NACIONAL. Perú, c. 2021, [en línea]. Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/1112.pdf>
- [45] Farhad Taghizadeh-Hesary and Ehsan Rasoulinezhad and Naoyuki Yoshino. Energy and Food Security: Linkages through Price Volatility. Energy Policy, 2019, [en línea]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.043>, Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518308486>
- [46] Aquae. Causas de la pérdida de biodiversidad. Fundación Aquae, c. 2021, [en línea] Obtenido el 5 de septiembre de 2021 de <https://www.fundacionaquae.org/causas-perdida-biodiversidad/>

- [47] Antonio Turiel. Antonio Turiel. Intervención en el senado. Video de Youtube. Google LLC, 2021, [en línea]. Obtenido el 5 de septiembre de 2021 de <https://www.youtube.com/watch?v=FRwRxGdavnI>
- [48] NEA-IAEA. Uranium 2020 Resources, Production and Demand. Agencia de Energía Nuclear, OECD. y Agencia Internacional de Energía Atómica, 2020, [en línea]. Obtenido el 5 de septiembre de 2021 de [https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555\\_uranium\\_-\\_resources\\_production\\_and\\_demand\\_2020\\_\\_web.pdf](https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555_uranium_-_resources_production_and_demand_2020__web.pdf)
- [49] EIA. Table 2.5 Transportation Sector Energy Consumption. Agencia Internacional de la Energía, 2021, [en línea] Obtenido el 5 de septiembre de 2021 de [https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec2\\_11.pdf](https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec2_11.pdf)
- [50] Richard Kraus. PETROLEO Y GAS NATURAL. Proceso de refino del petróleo. ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO. Oficina Internacional del Trabajo, 1998, [en línea]. Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de <https://www.insst.es/documents/94886/161971/Cap%C3%ADulo+78.+Petr%C3%B3leo+y+gas+natural#page=4&zoom=auto,0,-223>
- [51] British Petroleum. Statistical Review of World Energy 2021. British Petroleum, 2021, [en línea]. Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- [52] Antonio Turiel. Las consecuencias del pico del petróleo se nos echan encima. El periódico. Grupo Zeta, 2021, [en línea]. Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de [https://www.editorialalfabeto.com/uploads/RESED157Entrevista\\_a\\_Antonio\\_Turiel\\_en\\_El\\_Periodico.pdf](https://www.editorialalfabeto.com/uploads/RESED157Entrevista_a_Antonio_Turiel_en_El_Periodico.pdf)
- [53] Antonio Turiel. El ocaso del petróleo. Institut de Ciències del Mar (CSIC) & Oil Crash Observatory, 2017, Obtenido el 3 de septiembre de 2021 de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/221996/1/Turiel\\_2017.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/221996/1/Turiel_2017.pdf)
- [54] Real Academia Española. Mena. En Diccionario de la lengua española. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, ed. 23, 2014, [en línea]. Obtenido el 27 de octubre de 2020 de <https://dle.rae.es/econom%C3%ADa?m=form>