

ESTAMOS EN EL ANTROPOCENO

¿Es el fin de los tiempos?



COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA

Isaac Schifter
María del Carmen González Macías

Estamos en el Antropoceno
¿Es el fin de los tiempos?



Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. Invitamos a ver el proceso de dictaminación transparentado, así como la consulta del libro en Acceso Abierto.



www.comunicacion-cientifica.com

[DOI.ORG/10.52501/cc.195](https://doi.org/10.52501/cc.195)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I
COLECCIÓN
**CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Estamos en el Antropoceno
¿Es el fin de los tiempos?

ISAAC SCHIFTER
MARÍA DEL CARMEN GONZÁLEZ MACÍAS



Estamos en el Antropoceno : ¿Es el fin de los tiempos? / Isaac Schifter, María del Carmen González Macías. — Ciudad de México : Comunicación, 2024. (Colección Ciencia e Investigación).

176 páginas : gráficas ; 23 × 16.5 centímetros

ISBN 978-607-9104-46-7

DOI 1052501/cc.195

1. Estratigrafía — Antropoceno 2. Geología. 3. Ecología humana. I. Schifter, Isaac, coautor. II. González Macías, María del Carmen, coautora.

LC QE6 E88

Dewey 551.01 E88

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a los autores D. R. © Isaac Schifter, María del Carmen González Macías, 2024. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2024

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2024

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,

Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,

Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170

info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com

 [comunicacioncientificapublicaciones](#)  [@ComunidadCient2](#)

ISBN 978-607-9104-46-7

DOI 10.52501/cc.195



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso
abierto, en <https://doi.org/10.52501/cc.195>

Sumario

Prólogo	11
Capítulo I	15
Capítulo II	79
Capítulo III	133
Epílogo	159
Bibliografía	163
Notas sobre los autores	167
Índice de figuras y cuadros	169
Índice general	171

Resumen

Existe evidencia que soporta el hecho de que la especie humana por sí sola —que representa únicamente el 0.01% de la biomasa global— ha crecido para dominar el planeta sin ningún rival a la vista, pero con efectos ecológicos radicales que ponen en peligro la sobrevivencia de la vida tal y como la hemos conocido hasta ahora. Muchos científicos afirman que la era geológica del Holoceno, que hemos vivido desde hace 11 500 millones de años, ha dado paso a una nueva: el Antropoceno. Al empujar el clima terrestre y la biosfera fuera de la dinámica del Holoceno, la humanidad está en riesgo de conducir al planeta de una zona segura de operación a otra en la que pueden producirse cambios abruptos e irreversibles que impacten tanto a nuestra generación como a las venideras. La bioenergía puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes de energía fósil y nuclear sin provocar aumento en las emisiones que provocan el cambio climático. Asimismo, permite eliminar buena parte de los desechos orgánicos rurales y urbanos, y es la única fuente energética capaz de sustituir al petróleo en el sector del autotransporte. Es importante recalcar que la obtención de la bioenergía debe realizarse alejándose de los sistemas de producción agrícola intensiva, a gran escala y basados en monocultivos, ya que con frecuencia estos implican la deforestación y la pérdida de biodiversidad.

Palabras clave: *Antropoceno; transición energética; biocombustibles.*

Prólogo

Nuestro planeta está habitado por una enorme cantidad de formas de vida; de hecho, si bien se han identificado unos 1 200 millones de especies, se estima que el 86% de las existentes en la tierra y el 91% de las marinas no han sido descritas apropiadamente. Existe evidencia que soporta el hecho de que la especie humana por sí sola (que corresponde sólo a 0.01% de la biomasa) ha crecido para dominar el planeta sin ningún rival a la vista, pero con efectos ecológicos radicales en la biosfera, principalmente debido a las grandes innovaciones que han conducido a un incremento dramático de la población que pone en peligro la supervivencia de la vida tal como la hemos conocido hasta ahora. Una variedad de tendencias medibles muestra cómo la estructura del sistema ha sido alterado al grado de que ya no se parece en nada a lo visto en miles (y en algunos casos millones) de años. Como resultado de las acciones humanas, se observan hechos remarcables que incluyen el calentamiento de los océanos y el aumento de la temperatura de la superficie terrestre, el incremento atmosférico del óxido nitroso, la acidificación de los océanos, la pérdida de terreno para la agricultura y el descenso masivo de la biodiversidad. Ruth Irwin (1) sostiene que el hombre actual tiene la sensación de que se ha liberado de las cadenas que lo ataban al resto de la Naturaleza. Afirma que, gracias al progreso tecnológico, las grandes ciudades ya no morirán de hambre, como en el pasado, si falla una cosecha. Ya no dependen de las zonas rurales que las rodean y puede ser que ni siquiera estén al tanto de las inundaciones o las sequías que afectan al planeta. Se pregunta: ¿cuántos habitantes saben de dónde viene el agua potable de sus

ciudades o en qué estado se encuentran los bosques vecinos? Refiere que las ciudades ya no dependen de los productos de temporada, pues los medios de transporte y almacenamiento favorecen el comercio internacional y modifican la relación entre zonas urbanas y rurales. Además, las ciudades crecen, invadiendo el campo y absorbiendo migraciones masivas. A menudo, su construcción responde a imperativos tecnológicos y económicos, y no a necesidades públicas. (1) Todo lo anterior nos obliga a pensar en la aparición de una nueva era en la historia de la Tierra, que se ha dado en llamar *Antropoceno*. Este concepto ha generado debates intensos en la última década. De disciplinas tan variadas como climatología, geología, filosofía y artes visuales, los eruditos han asumido la tarea de pensar cómo funcionan ahora sus especialidades a través de una nueva época como el Antropoceno. Lo anterior significa que existen múltiples caminos para medir, criticar y reflexionar sobre los orígenes del Antropoceno, así como para determinar qué tipo de futuro se puede predecir ante las evidencias del presente. Si bien la evidencia geológica aún permanece en el campo del debate sobre el hecho de que se pueda declarar oficialmente la existencia del Antropoceno, una importante cantidad de eruditos acepta el postulado básico de que los seres humanos son agentes geológicos, y tratan de figurarse cómo y por qué ese es un asunto de vital importancia. Por más que el Antropoceno nos enseñe sobre la ciencia de la Tierra, también refleja atención hacia los seres humanos. En un nivel fundamental, inquieta la concepción intelectual y psicológica de quiénes somos los humanos y cómo nos relacionamos con el mundo que nos rodea, tal como lo refieren Hoffman y Deveraux (2). Dar cuenta del Antropoceno significa mucho más que los efectos individuales o acumulativos del cambio climático. Refleja una nueva realidad, según la cual los humanos y los no humanos, cosas y materiales, coexisten en relaciones complejas de vida y no vida. También refleja distintas formas de fracaso y negación. El fracaso de los países al no responder adecuadamente a la enorme cantidad de evidencias que nos advierten que debemos ajustar nuestras ideas y nuestros comportamientos y prepararnos para un futuro que no es igual al pasado. Adicionalmente, dado el bagaje de asuntos que está en juego, el Antropoceno representa el fracaso potencial de las sociedades humanas modernas para preservarse y sobrevivir ellas mismas, así como para proteger otras formas de vida. Al desplazar el clima de la Tierra y la

biosfera lejos de la dinámica del Holoceno, la humanidad corre el riesgo de que el planeta se mueva de sus operaciones seguras a otras que son impredecibles, abruptas y de cambios irreversibles que afectan a las generaciones de hoy en día y a aquellas por venir. Para frenar en lo posible los cambios que se están dando, la transición energética debe convertirse en un esfuerzo transformacional basado en el escalamiento y la implementación de todas las tecnologías disponibles para innovar en el futuro. Los combustibles fósiles y la electricidad han ayudado a crear el mundo moderno, al aumentar la productividad y reducir la población dedicada a la agricultura. Mecanizar la producción produjo que la fuerza laboral se moviera al sector de servicios, con lo cual las megaciudades y sus ámbitos conurbados se volvieron una realidad. Además se ha globalizado el comercio y la cultura al imponer muchas uniformidades estructurales en el mundo. Inevitablemente, todos esos desarrollos han tenido enormes consecuencias personales y colectivas al liberar a millones de personas de los duros trabajos físicos, mejorando la salud y la longevidad y disminuyendo el analfabetismo, lo que ha permitido romper los confines económicos y sociales. Sin embargo, esos beneficios en gran medida son disfrutados por una minoría de la población mundial (15%).

La gran transición energética del siglo pasado elevó el nivel de vida en muchas partes, pero no estuvo acompañada de un descenso sustantivo de las disparidades entre las sociedades ricas y las pobres. Se calcula que 10% de la población mundial consume más de 40% de toda la energía comercial primaria. Adicionalmente, la civilización moderna altamente energizada es una fuente enorme de contaminación ambiental y de degradación del ecosistema (posiblemente poniendo en peligro el mantenimiento de una biosfera habitable) que ha producido muchas enfermedades sociales, acentuadas por el urbanismo. Finalmente, el uso de la energía es de poca ayuda para explicar la descomposición del orden establecido.

El largo declive del Imperio romano no puede explicarse por una pérdida de bienes o por un brusco debilitamiento de las capacidades de conversión, como tampoco puede explicarse con esos argumentos la caída de la monarquía francesa durante 1780, el colapso del Imperio zarista en 1917 o la salida de los nacionalistas de la China continental en 1940. De la misma manera, históricamente muchas expansiones, como la del islam en los siglos

vii y viii, o las conquistas mongólicas del siglo xiii, no pueden correlacionarse por el uso mejorado de los combustibles.

La termodinámica requiere que cuanto mayor sea la complejidad socioeconómica, mayor debe ser el flujo de energía. Y aun así la posesión de fuentes abundantes de energía y un alto consumo no garantizan la seguridad de una nación, su confort económico o la felicidad personal de sus habitantes. El sistema de energía emergente debe promover economías y sociedades resilientes para un mundo más incluyente y equitativo. Hoy en día se necesitan acciones ambiciosas y puntuales en las décadas que vienen, para descarbonizar el sistema energético, tentativamente en 2050.

El sector energético genera aproximadamente 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que hay que reducirlas y, eventualmente, eliminarlas. Los biocombustibles y otros coproductos derivados de las microalgas tienen el potencial de mitigar las emisiones de gases tóxicos, aunque su producción comercial es una tarea desafiante, aunque no insalvable. A las algas biocombustibles se les reconoce hoy en día como una fuente de energía alternativa y limpia que atrae el interés de numerosos investigadores y entidades gubernamentales en muchas partes del globo.

Como menciona Will Steffen, “somos la primera generación con amplios conocimientos de cómo nuestras actividades influyen el sistema terrestre, y por ende, la primera generación con el poder y la responsabilidad de cambiar nuestra relación con el planeta” (3).

El Antropoceno presiona el tiempo histórico en dos direcciones opuestas, ambas al margen de la zona de confort que nos ha enseñado la historia. La dimensión geológica del concepto nos empuja hacia una historia antigua de la humanidad y la larga evolución del clima y los cambios naturales. El inicio específico del Antropoceno, sin embargo, empuja hacia la historia contemporánea que comienza con la industrialización. Se argumenta que el Antropoceno no debería narrarse, porque si bien la historia puede explorar algunos aspectos de la injusticia climática, el Antropoceno demanda acciones inmediatas.

Capítulo I

Nuestra relación con la energía

Desde los principios de la civilización, los seres humanos hicieron uso de la energía para llevar a cabo sus actividades diarias. La historia de la humanidad corre paralela con la historia del empleo de la energía: conforme la civilización y la población se agrandaron, de igual manera lo hizo la energía. Los antiguos imperios se desplomaron dando origen a nuevos, pero las fuentes de energía empleadas para empoderar a esos imperios continuaron evolucionando y ocasionalmente avances revolucionarios llevaron a la humanidad a nuevas eras.

La historia de la energía tiene mucho que ver con la de las transiciones energéticas. De hecho, hoy en día estamos en medio de una de esas transiciones, como consecuencias ambientales del alto empleo de combustibles fósiles en las que buscamos encaminarnos a una transición donde prevalezca la menor emisión de gases de efecto invernadero.

La Tierra, vieja de unos 4 500 millones de años, se formó por la creación de una nebulosa solar: una nube de gas y polvo dejada por el Sol que al enfriarse dio forma al planeta y, eventualmente, se hizo habitable para la vida. El proceso de la formación de la Tierra dio origen a algunas fuentes de energía que se emplean hoy en día. Por ejemplo, el calor geotérmico proviene en parte del calor atrapado bajo la corteza terrestre durante el proceso de formación del planeta; el uranio y el torio, combustibles nucleares, presuntamente se originaron en la explosión de la supernova que dio origen al material que forma el sistema solar.

El primer cambio mayor en el patrón de consumo de la energía y, con-

secuentemente, de la civilización, se dio aproximadamente hace unos 500 000 años, cuando los ancestros prehistóricos aprendieron a controlar el fuego. El quemado de la leña les permitió primero cocinar alimentos y con ello incrementar su ingesta calórica, y posteriormente fabricar herramientas sencillas.

Con la consecuente domesticación de los primeros plantíos, los seres humanos se volvieron más sedentarios, aunque necesitaban más energía para cultivarlos. La mayoría de la energía era proveída por el Sol; la otra provenía de los músculos del hombre que movía los arados.

El siguiente gran salto en el consumo de energía provino de la domesticación de los animales empleados en el trabajo. Los bueyes fueron domesticados alrededor del año 9000 antes de nuestra era en la India y en el Medio Oriente. Siguieron los burros cerca del año 5000, en Egipto; los caballos, en el 4000, en las estepas de Eurasia, y los camellos, alrededor del 3000 en Somalia y en Arabia del Sur. Todos estos animales eran más fuertes que los seres humanos y su empleo se tradujo en un arado de la tierra más rápido y profundo, con lo cual aumentó el rendimiento por unidad de área, lo cual a su vez se reflejó en el aumento de la población. El siguiente acontecimiento importante fue el uso de la energía eólica para transportarse por el mar.

Los primeros barcos se han documentado en Egipto y en Fenicia (hoy en día las costas del Líbano), alrededor del año 4000. La navegación ha persistido hasta nuestros días como una forma importante de transporte. Fue esta forma de energía la que permitió la creación de imperios coloniales en casi todo el mundo y constituyó la semilla de la globalización.

Si se reflexiona por un instante, se concluye que los vastos imperios romanos, españoles y mongólicos fueron construidos con sólo tres fuentes de energía: madera, animales domesticados y viento. Esas tres fuentes de energía hoy en día se llaman “fuentes renovables”.

Fue otro imperio, el británico, el que requirió una nueva fuente de energía. Conforme la población creció, la industrialización y el comercio marítimo comenzaron a disminuir los bosques, por lo que la hulla se convirtió en una fuente alternativa de la madera.

Las máquinas de vapor, puestas a punto por James Watt en 1770, aceleraron el uso de la hulla —un combustible fósil— como la fuente más significativa de energía. La combustión de la hulla genera vapor presurizado, el

cual puede emplearse para mover los pistones de una máquina. El desarrollo de los ferrocarriles se dio rápidamente, liderando la creación de una infraestructura de transporte interno que podía mover personas y bienes en tierra.

El inicio del siglo xx trajo dos avances significativos en el mundo de la energía. Primero, a inicios de 1900, los inventos de Tesla, Westinghouse y Edison permitieron la producción y la distribución comercial de la electricidad, lo cual dio paso a una miríada de utensilios eléctricos empleados diariamente. El segundo avance significativo ocurrió en 1908, cuando Henry Ford abrió la primera línea de ensamblaje de producción del automóvil Modelo T.

El uso de automóviles para el transporte privado incrementó la demanda de aceite y la fracción ligera de la gasolina, que a su vez aumentó aún más con la aparición de los aviones en 1903 y la demanda de diésel para trenes y barcos. A mediados del siglo xx se desarrolló la energía nuclear, una fuente increíblemente concentrada de energía proveniente de los núcleos atómicos.

Ha habido episodios prolongados de contaminación atmosférica en Inglaterra en 1950 y en Los Ángeles en 1970, así como accidentes nucleares responsables de alertar a los ciudadanos por las consecuencias que produce el empleo de grandes cantidades de energía, particularmente la derivada de fuentes fósiles.

El Holoceno

Vivimos en el periodo Cuaternario, la subdivisión más reciente de la era Cenozoica, que comenzó hace 65 millones de años. El Cuaternario es el tercero de los tres periodos de la era del Cenozoico, el cual se inició hace y que 2.58 millones de años representa menos de 0.1% del tiempo geológico. Una pequeña capa de sedimentos depositados en el Cuaternario cubre una buena parte de la superficie de la Tierra. En el cuadro 1 se muestran periodos y épocas de la era del Cenozoico.

Cuadro 1. *El Cenozoico, sus periodos y sus épocas*

<i>Era</i>	<i>Periodo</i>	<i>Época</i>	<i>Millones de años</i>
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0.01
		Pleistoceno	2.59
	Neógeno	Plioceno	5.33
		Mioceno	23.03
	Paleógeno	Oligoceno	33.9
		Eoceno	56.0
		Paleoceno	66.0

El periodo Cuaternario es famoso por sus numerosos ciclos de expansión y contracción glacial, por la extinción de muchas especies de grandes mamíferos y aves y por la dispersión de los seres humanos. El periodo Cuaternario se divide en dos épocas: la más joven es el Holoceno y la más vieja el Pleistoceno.

En el Pleistoceno, también conocido como Era del Hielo, los geólogos sugieren que esa época se inicia cuando el clima se enfrió y las capas de hielo cubrieron la Tierra, lo que trajo como consecuencia una disminución del nivel del mar a escala continental, con lo que apareció tierra seca en lo que hoy se conoce como el Estrecho de Bering, entre Alaska y Siberia, que permitió a los animales moverse entre dos continentes y la llegada de los primeros seres humanos a América. Entre los eventos más significativos del Cuaternario está la aparición de puentes de tierra que afectaron la migración de organismos durante el Neógeno.

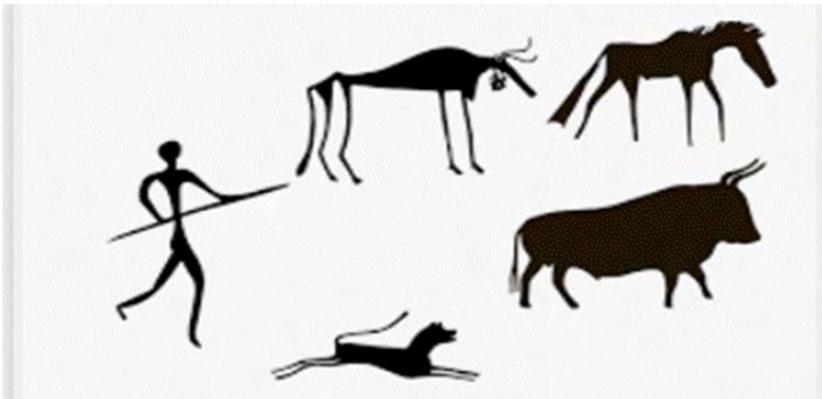
Al final del Pleistoceno una catástrofe destruyó dos tercios de los grandes mamíferos en América; las razones de este hecho aún no han sido resueltas, pero cambios del clima y la excesiva cacería pueden ser factores que lo expliquen. La época del Holoceno fue otra etapa interglaciar en la que en principio grandes glaciales retornarían en el futuro; sin embargo, este patrón natural puede ser perturbado por las actividades humanas con el incremento de la temperatura desde la Revolución industrial.

Los datos que arrojan los fósiles sin duda alguna revelan que los seres humanos han tenido un impacto enorme en el clima terrestre, en la flora y en la biota. Las temperaturas durante esta época son bastante mayores que las de las épocas anteriores. El promedio de las temperaturas fue un aumento de 4 a 9 grados centígrados, aproximadamente.

A inicios de este periodo hubo otra extinción masiva que eliminó a gran parte de la megafauna del planeta, quedando sólo la del sudeste asiático y la africana (aunque también sufrieron extinciones). A inicios de este periodo también se encuentran las primeras ciudades neolíticas y la humanidad se desarrolló hasta llegar a ser lo que es hoy.

El calentamiento del planeta no fue uniforme, ya que algunas regiones experimentaron un incremento mayor que otras. El último retroceso de los glaciares marca el comienzo del Holoceno, que se ha caracterizado por un clima estable y relativamente cálido: toda la historia de la humanidad desde poco antes de la invención de la agricultura se ha desenvuelto en condiciones del Holoceno (figura 1).

Figura 1. *El Holoceno*



El Holoceno es único, ya que coincide con la Edad de Piedra o la Etapa Lítica y es la primera división temporal de la prehistoria. Es decir, es el lapso que va desde el momento en que los seres humanos comenzaron a emplear instrumentos de piedra, hasta que utilizaron el bronce, dando inicio a la Edad de los Metales.

El término Edad de Piedra fue propuesto en el siglo XVIII por el danés Christian J. Thomsen que desarrolló una estructura para estudiar el pasado de los seres humanos. Las bases de esta estructura es tecnológica y gira alrededor de tres etapas sucesivas: la época de Piedra, la época de Bronce y la época de Hierro; cada una más compleja que la de sus antecesoras (5).

A pesar de lo que su nombre sugiere, las herramientas que los seres humanos emplearon durante la Edad de Piedra también estaban hechas de hueso, fibras, cueros, madera y arcilla. Pero en el registro arqueológico las herramientas de piedra son las que mejor se conservaron, por eso son las más abundantes. Sin embargo, centrarse demasiado en dichas herramientas podría hacernos perder de vista el hecho de que la Edad de Piedra representó un salto cuántico en la historia tecnológica y civilizatoria de la humanidad, durante el cual se inició la cultura (como evidencian las pinturas rupestres y las primeras figurinas de Venus).

Otro cambio importante es que se abandonó el nomadismo en favor de la vida agrícola y se domesticaron los primeros animales de granja. En cuanto a la geología, se trata de una época en que ha habido poca trascendencia puesto que no ha habido grandes cambios en movimientos orogénicos, o bien en la configuración de los continentes.

Teniendo en cuenta el fin de la glaciación, se estima que el nivel del mar ha aumentado un total de 35 metros desde que comenzó el Holoceno. Un dato preocupante es que en los últimos 25 años ha vuelto a incrementarse el nivel del mar a un ritmo de unos 3 mm por año, lo que es algo acelerado de acuerdo con lo normal. Esto se debe a un incremento del efecto invernadero que provoca un aumento de las temperaturas a nivel global y que es causado por la acción de algunos de los gases que son capaces de retener calor.

La ciencia del sistema terrestre

La Tierra está sujeta a cambios constantes. Aun el cuerpo sólido del planeta o las grandes capas polares cambian en periodos de décadas hasta millones de años. Estos cambios esencialmente son generados por la energía solar, el calor almacenado en el interior del planeta y la energía producto del decaimiento radioactivo de los minerales presentes en el manto y la corteza terrestres.

El mundo viviente también es afectado por estos largos procesos y está involucrado en los intercambios con varios componentes del sistema terrestre. A pequeñas escalas de tiempo, cada uno de estos subsistemas está en un estado de equilibrio dinámico. Consecuentemente, los procesos de inter-

acción entre varios subsistemas tienden a variar poco. Cuando los periodos son más largos, las fluctuaciones y las transiciones de un estado de equilibrio a otro son visibles. En el cuadro 2 se muestran los componentes del sistema terrestre.

Cuadro 2. *Componentes del sistema terrestre*

Atmósfera	La delgada capa constituida de gases y partículas suspendidas en el aire que rodea a la Tierra
Hidrosfera	Una esfera que incluye el océano, cuerpos de agua tierra adentro y agua subterránea
Cromosfera	Un subgrupo de la hidrosfera que consiste en agua congelada
Geosfera	Una esfera que incluye la Tierra sólida, el núcleo, el manto y las capas de suelo
Biosfera	Una esfera que incluye los organismos de la Tierra, incluyendo a los seres humanos y materia que no se ha descompuesto

El estudio del sistema terrestre —los componentes sociales y biofísicos, los procesos y las interacciones que determinan el estado y la dinámica de la Tierra, incluyendo su bioma y sus ocupantes humanos— ha llegado a un punto de transición.

En las últimas dos décadas, la prioridad ha sido entender el funcionamiento del sistema terrestre, en particular el impacto de las acciones humanas sobre el sistema. La ciencia ha avanzado al punto de que hoy se tiene un entendimiento básico de cómo esos cambios pueden afectar a la sociedad y al bienestar.

La investigación aporta conocimientos invaluable sobre los procesos biofísicos que determinan el funcionamiento y la resiliencia del planeta, la sensibilidad de los diferentes componentes del sistema que ponen en evidencia la aceleración de los cambios globales atribuibles al quehacer humano y las posibles consecuencias de dichos cambios, así como las dimensiones humanas sobre cómo atenderlos.

Se sabe lo suficiente para declarar, con alto grado de certeza científica, que sin acciones para mitigar los cambios globales más peligrosos, la humanidad ha llegado a un punto en su historia en el que los cambios climáticos, los ciclos hidrológicos, el sistema alimenticio, los niveles del mar, la biodiversidad, los servicios de los ecosistemas, y otros factores, merman los

prospectos de desarrollo y causan sufrimiento asociado con el hambre, las enfermedades, la migración y la pobreza.

Para lograr esos propósitos se requiere reenfocar las prioridades de investigación y reorientarlas hacia nuevas fronteras. Existe la necesidad de hacer una transición de la investigación dominada por las ciencias naturales a una investigación que involucra todo el rango de ciencias y humanidades que conduzcan a transformaciones significativas de estas disciplinas. Además, se requiere que la investigación dominada por los estudios disciplinarios se convierta en una mezcla más balanceada que facilite la interdisciplinariedad.

En el siglo xx, la filosofía de la ciencia tuvo momentos diferenciados. Uno de ellos fue el correspondiente al positivismo. Del agotamiento del positivismo nacieron las propuestas del destacado filósofo de la ciencia: Carl Popper. (6)

Gran parte del trabajo inicial de Popper respecto a la metodología de la ciencia tiene que ver con la física y los campos relacionados con ella, particularmente aquellos en los que la experimentación juega un papel fundamental.

De acuerdo con Popper, estas ciencias progresan formulando una teoría y diseñando experimentos y observaciones que traten de demostrar que la teoría es falsa. Este proceso, para Popper, diferencia las ciencias legítimas, como la física, de las actividades no científicas, como la metafísica filosófica. Popularmente, cuando observamos la historia de la ciencia, tenemos la sensación de que avanza y de que cada vez vamos acumulando más conocimiento.

El momento clave en la filosofía de la ciencia del siglo xx corresponde a la propuesta de Thomas Kuhn (1922-1996), uno de los teóricos de la ciencia más importantes del siglo pasado.

De acuerdo con Kuhn, el desarrollo de la ciencia no es uniforme, sino que tiene alternadamente fases “normales” y “revolucionarias”. Las fases revolucionarias no son únicamente periodos de un progreso acelerado, sino que difieren cualitativamente de la ciencia normal. (7)

La ciencia revolucionaria no es acumulativa, sino que involucra una revisión de conocimientos científicos y prácticas existentes. No todos los logros del periodo precedente de la ciencia normal se preservan en una revolución, y de hecho un periodo posterior de la ciencia se puede encontrar sin explicación para un fenómeno que en el pasado se tenía como explicado.

El Antropoceno

A través de los millones de años de la historia de la Tierra, cada evento de nuestro planeta se sucede porque algo lo fuerza a hacerlo. Tiempo atrás un asteroide provocó una extinción que originó un nuevo camino a la evolución. La tectónica de placas provocó el movimiento de los continentes.

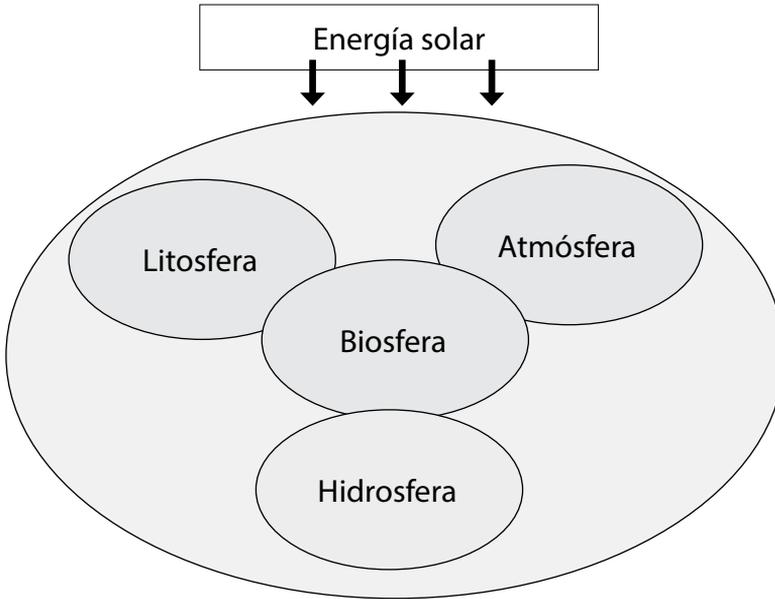
Contenido en nuestro sistema galáctico existe un sistema solar alimentado por una estrella. Como cualquier otro sistema, está compuesto de muchas partes en movimiento, gracias a flujos de energía y se mantiene en un equilibrio dinámico. Visto de manera simple, un sistema es un grupo natural de elementos que interactúan interrelacionados o independientes que forman un sistema complejo. En el sistema terrestre existen subsistemas que conforman el medio ambiente espacial (exosfera), el medio ambiente gaseoso (atmósfera), el líquido (hidrosfera) y, por último, el sistema de los organismos vivos (biosfera) (figura 2).

Conforme la energía fluye por una parte del Sol y por otra del interior de la Tierra, de la misma manera fluyen los nutrientes y los elementos en lo que se conoce como ciclos biogeoquímicos, como el ciclo del carbón o el ciclo del nitrógeno.

De acuerdo con L. Kamel, (8) la primera historia de una guerra entre seres humanos se llevó a cabo alrededor del año 2450 antes de nuestra era, entre el reino de Lagash y el de Umma en la antigua Mesopotamia (hoy Iraq). El conflicto se originó por el reclamo de ambas partes sobre las fuentes de agua. Existen buenas razones para creer que la última guerra en nuestro planeta tendrá las mismas causas. Más aún si consideramos que, 4 450 años más tarde, la mayoría de los riesgos climáticos giran en torno del preciado líquido como consecuencia de los cambios realizados en el planeta por la humanidad.

En virtud del grado en el que los humanos causan cambios, no sorprende que a la presente era geológica se le conozca como el Antropoceno (en griego “nueva era humana”). El Antropoceno es un término acuñado por el biólogo Eugene Stoermer en 1980 y popularizado por el químico y Premio Nobel, Paul Crutzen, en el año 2000, en el cual se enfatizaba cómo las ac-

Figura 2. Los componentes del sistema terrestre



ciones de los humanos modificaban en todas sus formas las características físicas, químicas y biológicas. (9)

Un artículo de Crutzen en la revista *Nature* decía que

en los últimos tres siglos, los efectos de los humanos en el medio ambiente global se han escalado. Debido a las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono, el clima global puede desviarse significativamente de su comportamiento natural en los milenios por venir. Parece por tanto apropiado asignar el término Antropoceno, de muchas formas una era geológica dominada por los humanos, que sobrepasa al Holoceno —periodo caliente de los últimos 10 a 12 milenios. Se puede decir que el Antropoceno se inició en la última parte del siglo XVIII cuando los análisis del aire atrapado en los hielos polares mostraron el comienzo de una concentración creciente de dióxido de carbono y metano. Esta época parece coincidir con el diseño de la máquina de vapor por James Watt en 1784.

Como veremos posteriormente, existe algo de desacuerdo acerca de cuándo inicia el Antropoceno. Algunos científicos argumentan que la escl-

vitud y la colonización europea define el Antropoceno, mientras que otros afirman que la deforestación masiva ha generado desperdicios debido al establecimiento de plantaciones y a la explotación económica.

El término Antropoceno se ha creado para designar las repercusiones que tiene el clima y otros factores que provocan daños irreversibles ocasionados por el consumo excesivo de recursos naturales. Pero ¿se puede usar este vocablo para definir una nueva época geológica?

La respuesta a esta pregunta ha suscitado un apasionado debate entre los científicos, ya que existe una negativa colectiva a ver la realidad, que es fruto, a la vez, de una creencia ingenua en el progreso, de una mentalidad consumista y de las presiones ejercidas por potentes grupos económicos.

Según Trischler, la discusión acerca de la “época de los seres humanos” se ha expandido más allá del ámbito de las ciencias biológicas y geológicas y se ha convertido en parte de la “cultura popular”. (10)

El Antropoceno ya no se limita al ámbito académico y es ampliamente debatido por los medios de comunicación y por el público en general. Las actividades humanas han inyectado nuevos factores biofísicos en la biosfera, modificando los parámetros que determinan el funcionamiento de los sistemas terrestres más importantes. El resultado no es sólo el cambio climático, que atrae la mayor parte de la atención, sino también las transformaciones ambientales que de igual manera amenazan los espacios operativos de la humanidad.

Como Steffen y colaboradores observan:

La concentración atmosférica de los tres gases de efecto invernadero, dióxido de carbono, óxido nitroso y metano están muy por encima de los máximos observados en cualquier tiempo durante el Holoceno [...] No hay evidencia de un descenso significativo del ozono estratosférico que se haya sucedido en el Holoceno. Tampoco hay evidencia de que los impactos humanos en la biosfera marina, medidos por la cantidad total de toneladas de peces capturados, estén cercanos a los últimos años del siglo xx o a cualquier otra época temprana del Holoceno. El ciclo de nitrógeno ha sido masivamente alterado en el último siglo [...] La química del carbonato en los océanos está cambiando más rápido que cualquier otro tiempo en los últimos 300 millones de años y la pérdida de biodiversidad se aproxima a velocidades de extinción masiva. (11)

A medida que la industrialización dejó una marca visible en el mundo, los científicos empezaron a prestarle atención. En 1775, el naturalista Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon, distinguió entre la naturaleza original y la naturaleza civilizada por el ser humano y observó que “toda la faz de la Tierra lleva la huella del poder humano”.

El geólogo Antonio Stoppani (1824-1891) es una notable pero poca conocida figura en la historia de la ciencia y de las humanidades teóricas. Con la llegada del Antropoceno, muchos científicos han vuelto a revisar los escritos de Stoppani, los cuales tienen argumentos elocuentes concernientes a la aparición de la actividad humana. Sostiene: “En este sentido, con precisión, no dudo en proclamar la era Antropozoica. La creación del hombre constituye la introducción en la naturaleza de un nuevo elemento con una fuerza no conocida en tiempos pasados”. (12)

Hace más de 150 años George Perkins Marsh (1801-1882) publicó *Man and Nature (Geografía física modificada por la acción humana)*, un estudio acerca de cómo la acción humana modificaba el mundo físico, desde la corteza terrestre hasta la atmósfera. Comienza con capítulos sobre “Los efectos generales y las posibles consecuencias de la acción humana sobre la superficie de la Tierra y la vida que la rodea”. (13)

Marsh menciona “la historia de la industria del hombre ejercida sobre la vida animal y vegetal, sobre los bosques, sobre las aguas y sobre las arenas; y a esto he agregado un capítulo final sobre las revoluciones geográficas probables y posibles que aún no han sido efectuadas por el arte del hombre”.

El propósito del libro de Marsh es vasto; empieza con capítulos sobre “Los efectos generales y las posibles consecuencias de las acciones humanas en la superficie terrestre y la vida de la que la viven”. Marsh prosigue luego para trazar “La historia de la industria del hombre y su efecto sobre la vida animal y vegetal así como en los bosques, las aguas y arenas...” A pesar de lo vasto de su proyecto, el mensaje de Marsh a los lectores es claro: si las personas no toman cuidado de la Tierra, la Tierra dejará de tomar cuidado de ellas. Sus principales reflexiones son las siguientes:

- La deforestación sin un plan de reforestación conlleva problemas más serios tales como erosión del suelo y sedimentación.

- Sobre los cambios climáticos, los considera como microimpactos ambientales, refiriéndose a la erosión y a la descongelación de glaciares.
- Aplicó la teoría del caos principalmente a la dinámica alimentaria; destacó que como consecuencia del desmedido uso de los recursos se estaba alterando el sistema con consecuencias irreparables e irremediablemente graves.
- Señaló que si un recurso es constantemente utilizado no sólo no puede mantenerse, sino que terminará colapsando. (13)

Joseph Le Conte, un geólogo estadounidense pensaba que el periodo más reciente debía llamarse era “Psicozoica”. Escribió que “la era del hombre está caracterizada por el reino de la mente”. Creía que la humanidad se había convertido en el “‘principal agente de cambio’ del mundo natural y que provocó la extinción de numerosas grandes especies”. (14)

En 1922 el científico Aleksei Pavlov fue el primero en sugerir que la era geológica en curso debía llamarse “Antropógeno”. La palabra ganó adeptos en los círculos científicos y fue aprobada en 1963 como el equivalente al Cuaternario. A principios de los años veinte del siglo pasado, tres científicos, Vladimir Vernadsky, Pierre Teilhard de Chardin y Édouard Le Roy, emplearon la palabra *Noösphere* para referirse a la esfera que forman los organismos inteligentes y el medio en el cual habitan.

Entre 1600 y 2010 se ha dado seguimiento a la cantidad de plomo depositada en la atmósfera para lo cual se han tomado muestras del hielo en la Antártida. Los resultados demostraron que en 1889 la contaminación industrial por plomo, proveniente de la minería y de las actividades de fundición, ya se encontraba presente en grandes cantidades, en algunas muestras, dos décadas antes de que los primeros exploradores llegaran al Polo Sur. (15)

Dice Carlos Peralta (16) que a finales del siglo xx numerosos investigadores anticiparon la idea del Antropoceno. Afirma que el más destacado fue el biólogo Hubert Markl, quien en la década de 1980 se refirió al *Anthropozoikum* para describir la era actual. Menciona que Markl, al utilizar dicho término, no estaba preocupado por la datación del nuevo tiempo geológico: para él lo importante era que este tiempo, marcado en particular por una pérdida masiva de biodiversidad, ya había comenzado. Sin embargo, subestimó los desafíos de su definición. (16)

El término *Antropoceno* tiene un carácter similar al de *Renacimiento*. Ambos se refieren a actividades ricamente documentadas de las actividades humanas numeradas en el calendario gregoriano. Ambas tienen una connotación significativa. Aunque no se especifica un año preciso para su inicio, el Renacimiento es un término bien establecido con un significado preciso del contenido de ese periodo, dónde inició, cómo evolucionó y cómo se dispersó.

Lo mismo es válido para el Antropoceno, ya sea por la construcción de una presa hidroeléctrica, una mina en Sudáfrica, el incremento exponencial de las megaciudades, la deforestación, el incremento de dióxido de carbono en la atmósfera o el aumento de la temperatura de la Tierra.

No debemos olvidar a Rachel Carson que en parte fue responsable de popularizar la noción de “ecología”, si bien pensadores como Ernest Haeckel habían abordado ese concepto desde 1866. Carson ayudó a que el público se diera cuenta de la idea, así como también a enfocarse en la forma en que los sistemas ecológicos (“ecosistemas”) podían ser destruidos.

Carson puso en evidencia que lo que se consideraba como un mínimo cambio tenía profundos efectos destructivos. Por ejemplo, al eliminar una cierta variedad de insecto, que pareciera de pocas consecuencias, se inicia una serie de eventos que causan problemas por sorprendentes largos periodos, como en el caso de los biocidas y de otros químicos que se acumulan con el tiempo en el cuerpo de los animales, como es el caso del mercurio en los salmones y en otros pescados. (17)

En 1962, Rachel publicó su libro más popular, *Silent Spring*, en el que nos prevenía sobre el uso de los pesticidas fabricados por el hombre, especialmente el DDT (dicloro-difenil-tricloroetano), que se produjo durante la Segunda Guerra Mundial. Carson señalaba que si los seres humanos continuaban empleando este pesticida sin limitaciones, el químico dañaría el ambiente; entre otras cosas, debilitaba los huevos de los pájaros, por lo que nos enfrentaríamos a experimentar una “primavera silenciosa”, sin el ruido de los pájaros.

De hecho, *Silent Spring* tuvo el acierto de pocos libros científicos ya que logró iluminar el conocimiento de procesos que tienen lugar en la naturaleza y despertar el interés de la sociedad tanto por la ciencia que es necesaria para comprender lo que sucede en nuestro planeta, como por la situación presente y futura de la vida que existe en él.

El filósofo, antropólogo y sociólogo Bruno Latour señala un interesante paralelismo entre el actual debate sobre el papel de los seres humanos como una fuerza geológica y la controversia sobre el estado de los seres humanos en el universo, que Galileo Galilei puso en marcha hace más de 400 años, cuando presentó la tesis de que la Tierra se movía alrededor del Sol y cuestionó la concepción establecida del mundo, lo que atrajo la atención de la Inquisición. (18)

Latour subraya que la tesis del Antropoceno no es que “la Tierra se está moviendo”, sino más bien que “la Tierra se mueve” gracias a los seres humanos. Esta tesis también altera de manera radical nuestra concepción del mundo y convoca a la Inquisición de nuestra época, que Latour identifica, sobre todo, como esos “círculos en la política y en la industria que niegan que los seres humanos son la causa del cambio climático”. (18)

En Latinoamérica, el debate sobre el Antropoceno no se desarrolla del mismo modo que en Europa o en Estados Unidos. Esto puede explicarse parcialmente por el hecho de que la noción de Antropoceno se centra en problemas globales que requieren respuestas globales a expensas de las historias locales de desposesión territorial y ambiental. De hecho, la noción de Antropoceno podría ignorar las relaciones de poder y el carácter específico de las desigualdades sociales y las transformaciones ambientales en el contexto latinoamericano. Además, la narrativa del Antropoceno a menudo ignora otras perspectivas culturales y otros sistemas de conocimiento.

Estos sistemas y perspectivas se sustentan en relaciones diversas entre humanos y no humanos, en contextos históricos particulares. En Latinoamérica es necesario considerar el análisis de los procesos de extracción desde el periodo colonial hasta el siglo XXI, los cuales han exacerbado las desigualdades socioambientales. Tales procesos responden a una dinámica económica particular; a saber, la lógica del capitalismo, la cual ha generado transformaciones globales-locales.

¿Capitaloceno o Antropoceno?

De una forma u otra, la acción y la interacción entre la vida y lo que la rodea ha estado en marcha desde entonces. Jason W. Moore, profesor de historia

universal, en sus trabajos sobre desarrollo del capitalismo, historia ambiental, ecología-mundo y ecología, afirma que “habría que indagar los orígenes del capitalismo y la expansión de las fronteras de la mercancía, en la larga Edad Media, para dar cuenta de la fase actual”. (19)

De acuerdo con Moore, el Antropoceno se ha convertido en el más importante —y también el más peligroso— concepto medioambiental de nuestros tiempos. Según Moore, es peligroso no sólo porque modula mal la crisis planetaria, sino porque simultáneamente trata de aclarar los cambios de estado de la naturaleza planetaria sin discutir la historia que está detrás de esos cambios: “No hay una frase que cristalice más el peligro que las palabras antropogénico y calentamiento global; esto es sin duda una colosal falsificación”.

El calentamiento global es el logro más importante alcanzado por el capital. El calentamiento es “capitalocénico”, ya que el Antropoceno unifica al sistema terrestre y a la humanidad en una narrativa única y es precisamente su debilidad y la fuente de su poder de falsificación. ¿Vivimos entonces en el Capitaloceno, la era histórica que da forma a nuestras relaciones privilegiando la acumulación del capital? (19)

Por ello se debe abrir un debate sobre las implicaciones de los conceptos “Capitaloceno” y “Antropoceno”. Capitaloceno surge como una crítica de la noción de Antropoceno, al considerar que la acción humana siempre está atravesada por relaciones políticas y económicas de poder, así como por desigualdades en el contexto del capitalismo global.

Por lo tanto, el Capitaloceno resalta como valoraciones, económicas capitalistas de apropiación de naturalezas y territorios, pues no sólo las acciones humanas directas son causa de las transformaciones ambientales. Algunas perspectivas consideran que el Antropoceno permite hacer un diagnóstico crítico de los efectos del desarrollo y el capitalismo.

Otros lo ven como una oportunidad política de repensar las relaciones sociales a fin de construir nuevas relaciones con el ambiente. Es una propuesta de vivir juntos reconociendo la existencia de todas las especies y su diversidad, así como de sus modos de vivir, pensar y actuar en contextos situados y localizados. También es un llamado a crear nuevas posibilidades de ser y futuros mediante la reorganización de la vida colectiva, los bienes comunes y las políticas públicas, con base en la justicia socioambiental, la transdisciplinariedad, la educación, el arte y la espiritualidad.

También permite abrir discusiones y convocar a personas de diferentes trayectorias, culturas y perspectivas, para participar en la construcción de nuevas nociones y prácticas en relación con la naturaleza, el Estado y los derechos de seres humanos y no humanos. Ahora bien, discursos como los mencionados exigen buscar opciones tanto individuales como colectivas para repensar el capitalismo e incluso para retomar los principios filosóficos de relacionamiento con el entorno, por ejemplo, de los pueblos indígenas y las sociedades que establecen otro tipo de vinculaciones no basadas en procesos de apropiación económica de la naturaleza.

Desde una perspectiva latinoamericana, en lo que respecta a los modelos de Antropoceno y Capitaloceno, es necesario examinar las implicaciones de ambos modelos en los ámbitos territoriales, ambientales, culturales y de género, y en la manera en que se producen conocimientos que incidan en las políticas globales. Esto implica repensar y, de hecho, *descolonizar* la categoría de “naturaleza” y la forma en que se producen conocimientos, así como las relaciones de poder que atraviesan la relación de seres humanos y no humanos para repensar el tema ambiental desde una perspectiva plural y diversa.

Algunas evidencias del Antropoceno: los mayores problemas

La crisis climática implica muchos factores que tienen un papel relevante en la exacerbación del medio ambiente y unos necesitan más atención que otros. Veamos los más importantes:

1. Calentamiento global por los combustibles fósiles

En mayo de 2023 las partes por millón de CO₂ rondan las 420 unidades y la elevación de la temperatura global es 1.15 °C mayor que la que había en la época preindustrial. Éste, sin duda, es uno de los más grandes problemas ya que las emisiones de gases de efecto invernadero atrapan el calor solar, ca-

lentando el planeta. Lo anterior ha traído como consecuencia eventos catastróficos en todo el mundo: incendios estacionales nunca vistos, plagas de langostas que destruyen cultivos y causan daños enormes a la agricultura, con la miseria humana y la hambruna que eso conlleva.

Se encuentran en muchas partes del mundo, pero en la actualidad son más destructivas en las tierras de agricultura de subsistencia de algunas regiones de África; por ejemplo, temperaturas en la Antártida superiores a 20 °C, a lo que hay que sumar tormentas tropicales, huracanes e inundaciones más frecuentes que a las que estábamos acostumbrados.

2. Mala gobernanza

Muchos economistas piensan que la crisis climática es el resultado de múltiples fallas de los mercados. Los economistas y los ambientalistas han urgido a los gobiernos por años para incrementar el precio de aquellas actividades que emiten gases de efecto invernadero. El no hacerlo constituye un fracaso del mercado, ya que, por ejemplo, a través de impuestos de carbono se estimula la innovación para desarrollar tecnologías de bajo carbono.

Para disminuir las emisiones rápida y efectivamente los gobiernos deben incrementar los fondos no sólo para promover la innovación verde, sino también para adoptar políticas que ataquen las otras fallas del mercado.

Más aún, organizaciones como las Naciones Unidas (ONU) no están habilitadas para combatir la crisis ambiental. Los miembros de la ONU no tienen el mandato de cumplir cualquier sugerencia o recomendación hecha por la organización. Por ejemplo, el Acuerdo de París, según el cual los países deben reducir las emisiones significativamente para que la temperatura no se eleve por encima de 1.5 °C, es voluntario y no hay repercusiones si algún país no cumple con ese compromiso.

3. Desperdicio de alimentos

Un tercio de la comida para el consumo humano, unos 1 300 millones de toneladas, se desperdicia o se pierde. Esta cantidad es suficiente para alimen-

tar a 3 000 millones de personas. El desperdicio de comida y su pérdida representan un tercio de las emisiones de gases invernadero.

El desperdicio de comida ocurre en diferentes etapas tanto en países en vías de desarrollo como en países desarrollados. El 40% de la pérdida ocurre después de la cosecha y en el procesamiento posterior, y otro 40% ocurre a nivel de la venta y el consumo, mucho de ello debido a razones estéticas. Todo esto trae consigo la inseguridad alimentaria, otro de los grandes problemas ambientales.

4. Pérdida de biodiversidad

La forma general en que las sociedades se han desarrollado (con una distribución cada vez más urbana y un aumento de nuestros patrones de consumo alimentarios y energéticos) tiene un impacto en la naturaleza que puede llegar a afectar todos sus niveles de organización, desde el ámbito genético hasta los ecosistemas, que se expresa en distintas escalas y, por supuesto, con gran intensidad en zonas muy transformadas por la concentración de la población humana.

En contraparte con la exuberancia de la vida en su ámbito natural, en general el desarrollo de las sociedades modernas ha sido a costa de una pequeña selección de especies de la diversidad biológica que tienen interés económico. A raíz de ello, se ha simplificado o, incluso, devastado hábitats y ecosistemas para generar monocultivos y desarrollar la ganadería y la pesca comercial. Si bien dicha simplificación tiene ciertas ventajas de “eficiencia” y económicas, también ha generado grandes costos.

Además de perder una cantidad neta de hábitat natural, los procesos de cambio de uso de suelo forman fragmentos de hábitat de diferentes tamaños y distancias entre sí. Los más pequeños muchas veces no tienen la viabilidad para mantener poblaciones de especies o procesos ecológicos necesarios, por lo que se producen extinciones o pérdida de servicios ambientales locales.

La extinción de especies se debe a múltiples factores; el mayor, seguramente, es la pérdida de hábitat, pero también se conjugan presiones directas como la sobreexplotación y el comercio legal e ilegal que tienen un impacto

enorme en ciertos grupos de especies especialmente carismáticas, como cactus, orquídeas o aves vistosas, y también de aquéllas usadas como alimento (por ejemplo, muchos recursos pesqueros sobreexplotados).

En los últimos 50 años ha habido un rápido crecimiento en el consumo de los seres humanos, de la población y de la urbanización, lo que ha traído como consecuencia que la humanidad consuma más los recursos del planeta de lo que se puede reponer naturalmente. Un estudio reciente encontró que el tamaño de la población de mamíferos, peces, aves, reptiles y anfibios ha experimentado un declive promedio de 68% entre 1970 y 2016.

El reporte atribuye esta pérdida de biodiversidad a una variedad de factores, pero principalmente al cambio en el uso de la tierra para aumentar la agricultura. Un trabajo aparecido en la revista de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos da como resultados que la sexta extinción masiva de la vida silvestre se está acelerando.

Se considera que una extinción masiva implica la pérdida de por lo menos tres cuartas partes de los recursos naturales a lo largo de todo el planeta en un periodo de tiempo geológico corto. Los científicos afirman que la extinción en curso puede ser un peligro para la subsistencia de la civilización, porque es irreversible. Cuando una especie muere, la habilidad de la Tierra para mantener el ecosistema se erosiona en cierto grado, ya que se requiere un clima relativamente estable, flujo de agua fresca, control de plagas y polinización de las cosechas y todos estos servicios se ven impactados por la extinción.

5. Contaminación por plásticos

El plástico es un material duradero y flexible que está omnipresente en la vida moderna, desde los embalajes hasta la ropa y los productos de belleza. Sin embargo, se desecha a una escala descomunal: cada año, más de 280 millones de toneladas de productos plásticos de vida corta terminan en la basura. Los plásticos se empezaron a producir en grandes cantidades al término de la Segunda Guerra Mundial y desde entonces su contaminación se ha convertido en uno de los más serios problemas que enfrenta la humanidad. (20)

En 2015 el 60% de todos los plásticos que alguna vez se produjeron, se han convertido en desechos, y en el mundo actual esos desechos están presentes en aire, suelo y agua fresca, así como también en los océanos. Cerca de 80% de los desechos plásticos que se encuentran en los océanos proviene de las ciudades; el 20% restante, de actividades realizadas en el océano, como la pesca, los acuocultivos y el transporte marino.

Las aguas que entran a los tratamientos municipales contienen gran cantidad de microfibras textiles de microplásticos que permanecen en el residuo del tratamiento, el cual suele emplearse como fertilizante en la agricultura, con lo cual los plásticos son depositados en los campos agrícolas donde pueden permanecer por largos periodos de tiempo, o ser lavados por los ríos y de ahí desechados a los océanos. Los microplásticos depositados en la tierra pueden persistir más de 100 años debido a la poca luz y a la falta de oxígeno. (20)

En las especies marinas, la ingestión de plásticos tiene impactos mayores en las funciones fisiológicas, incluyendo la nutrición, el crecimiento, el comportamiento y la reproducción. ¿Es la contaminación el único problema del plástico? No, también es un factor causante de la crisis climática. La producción de plástico es uno de los procesos de fabricación más intensivos en energía del mundo. Este material se fabrica a partir de combustibles fósiles, como el petróleo crudo, que se transforman mediante calor y diversos aditivos en un polímero. En 2019 los plásticos generaron 1800 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero: el 3.4% del total mundial. (20)

6. Deforestación

Según la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2020 de la FAO, desde 1990 se han perdido 420 millones de hectáreas de bosque en todo el mundo debido a la deforestación. Sin embargo, la deforestación ha disminuido considerablemente en los últimos cinco años, con una estimación de 10 millones de hectáreas en el periodo 2015-2020, frente a 12 millones de hectáreas de 2010-2015. (21)

Los bosques desempeñan un doble papel para el planeta: son, a la vez, “pulmones de la Tierra” y reservas de biodiversidad. Por ser sumideros de carbono naturales, mitigan los efectos negativos del calentamiento global al capturar y almacenar el CO₂ en la atmósfera y sirven de hábitat natural para miles de especies animales y vegetales. Las tres principales consecuencias de la deforestación son:

- a) *Pérdida de biodiversidad*: como los bosques son el hábitat natural de muchas especies, su destrucción tiene un impacto directo en la supervivencia de la biodiversidad mundial.
- b) *Degradación de los suelos*: los bosques hacen que los suelos sean más ricos en materia orgánica y, por tanto, más resistentes a la meteorización y a la erosión.
- c) *Calentamiento global*: los árboles absorben el CO₂ a lo largo de su vida y así mitigan el efecto invernadero. (21)

7. Contaminación del aire

La contaminación se refiere a cualquier cambio físico, químico o biológico que sucede en el aire. Dicha contaminación se produce por gases dañinos, polvo y humos que afectan drásticamente a las plantas, a los animales y a los seres humanos. Existe un cierto porcentaje de gases presente en la atmósfera; un incremento o un descenso en la composición de estos gases provoca un incremento en la temperatura terrestre.

Los efectos dañinos que produce la contaminación del aire incluyen los desórdenes respiratorios y del corazón en los seres humanos, sin olvidar que los casos de cáncer pulmonar se han incrementado en todo el mundo.

La combustión de los derivados del petróleo emite gases como los óxidos de nitrógeno y de azufre que se mezclan en las gotas de agua y al combinarse se acidifican, precipitándose como lluvia ácida que daña a humanos, animales y plantas. (22)

8. Deshielo de las capas y elevación del nivel del mar

De acuerdo con Steve Tuton del International Science Council, en su reporte de 2016, la crisis climática está calentando el Ártico dos veces más rápido que cualquier otro lado del planeta. Los mares se están elevando un promedio de 3.2 mm por año y continuarán creciendo a 0.7 metros para el fin de este siglo. Este fenómeno sin duda es uno de los problemas ambientales más serios dado que en 2022 se perdieron alrededor de 60 000 millones de toneladas de hielo de Groenlandia, suficiente para elevar el nivel global del mar en 2.2 mm en dos meses, y si Groenlandia se licuara, el nivel crecería a seis metros. Obviamente la elevación del nivel del mar tendrá impactos devastadores en las regiones costeras.

9. Agricultura

El desarrollo de la agricultura, que emergió en los inicios del Holoceno, ha alterado la abundancia y el tipo de especies de plantas y animales. Esos lugares de cultivo están cubiertos de plantas en las que muchas de éstas crecen en lugares en los que no son originarias y han traído consigo especies invasivas que disminuyen la productividad.

Los estudios han mostrado que el sistema alimentario global es responsable hasta de un tercio de la emisión de gases de efecto invernadero generados por la humanidad, de los cuales 30% proviene del ganado y la pesca. Adicionalmente se libera óxido de nitrógeno debido al empleo de fertilizantes. La agricultura no sólo cubre una vasta cantidad de tierra, sino también consume una gran cantidad de agua; de hecho, consume tres cuartas partes de los recursos acuíferos, ya de por sí limitados, del planeta. Por lo tanto es necesario repensar la manera de alimentarnos en el futuro.

10. Los textiles

La demanda mundial por ropa se ha elevado a una velocidad sin precedente. La industria de la moda aporta 10% de las emisiones de gases de efecto

invernadero, siendo uno de los grandes problemas de nuestra época. Para dar una idea, la industria del vestido produce más gases de efecto invernadero que la aviación y la industria naviera juntos y casi 20% de desperdicio de agua por el teñido de los textiles.

Además, la industria genera unos 92 millones de toneladas de textiles que van a la basura y se espera, de seguir las cosas como van, que llegue a 134 millones para 2030. Si bien esos son algunos de los mayores problemas ambientales que torturan a nuestro planeta, hay muchos más que no hemos mencionado, incluyendo la sobrepesca, el uso de la tierra, el desarrollo urbano, etc. Lo que es cierto es que existen muchas facetas que deben considerarse al formular una respuesta a la crisis. Y esta respuesta debe ser coordinada, práctica y lo suficientemente profunda para hacer una diferencia sustancial.

11. Degradación de la biosfera

La biosfera es un organismo autoorganizado que se regenera. Los ecologistas generalmente representan el estado de la biosfera como una distribución espacial de la biomasa expresada, por ejemplo, en kilogramos. A la velocidad regenerativa de la biosfera se le denomina productividad primaria neta, la cual es una distribución espacial de compuestos orgánicos que son fijados por los organismos que obtienen la energía directamente del Sol para producir su propia alimentación, menos su respiración por unidad de tiempo. Durante la respiración, los compuestos orgánicos se rompen para proveer el combustible que gobierna las actividades de los productores primarios. (23)

Una manera de particionar la biosfera en término de constituyentes interconectados son los ecosistemas. Los ecosistemas combinan un medio ambiente abiótico con las comunidades biológicas para formar las unidades de autoorganización de regeneración. Los ecosistemas se regeneran; un ejemplo puede ser el de los nuevos bosques que emergen de las cenizas de los fuegos gracias a la biodiversidad que permite que la regeneración ocurra. La habilidad de regenerarse se ve afectada cuando los ecosistemas están sometidos a presiones no usuales provenientes de agentes externos, como pueden ser los seres humanos y sus actividades. (23)

La pérdida de la biodiversidad compromete servicios del ecosistema, como la polinización, que pueden colapsar el ecosistema. En los sistemas marinos, la pérdida de oxígeno en parte de los océanos ha generado unas 700 zonas en el mundo consideradas zonas muertas con pérdida de la biodiversidad que incrementa la emisión de gases de efecto invernadero. (23)

El cambio climático ya está contribuyendo a cambios de amplia escala en los ecosistemas; por ejemplo, el caso de los sistemas acuáticos en tierra que se han visto alterados, aunado a los cambios en la frecuencia de los incendios y la precipitación. Más aún, el cambio en el uso del suelo, en particular la deforestación, puede continuar siendo un contribuyente significativo del cambio climático, entre otras cosas por la enorme cantidad de carbono que se acumula en los sistemas vivos. (23)

12. Alteraciones biogeoquímicas

Los ciclos biogeoquímicos son vías por las cuales los elementos como el carbono, el fósforo, el nitrógeno y el azufre, o compuestos como el agua, fluyen entre los organismos vivientes y el medio ambiente. Las actividades humanas pueden alterar estos ciclos. Por ejemplo, el uso de fertilizantes agrícolas y la erosión del suelo han incrementado sustancialmente los niveles del nitrógeno y el fósforo biológicamente disponibles para los sistemas naturales.

La producción humana de nitrógeno biológicamente disponible, principalmente por la producción sintética de fertilizantes, es notablemente mayor que todas las formas naturales de producción. Los seres humanos también han intensificado la emisión de fósforo, cuyas causas son variadas; por ejemplo, el incremento en la erosión del suelo, el reciclaje de residuos de las siembras, las descargas de desechos industriales, pero, sobre todo, la producción de fertilizantes.

Hay que tomar en cuenta que la producción global de alimentos es altamente dependiente del uso continuo de fosfatos y que el fósforo que se pierde llega al agua y es la causa principal de la eutroficación. (24)

Por otra parte, sabemos que el nitrógeno es un nutriente esencial para las plantas y muchos ecosistemas terrestres se han adaptado a condiciones de

baja disponibilidad de nitrógeno, lo que a veces propicia comunidades de plantas de gran diversidad.

Globalmente, los escenarios de emisiones de nitrógeno se han incrementado en la mayoría de las regiones, lo que causa incertidumbre sobre el posible significado que tendrá ese elemento sobre la biodiversidad de las plantas. El exceso de nitrógeno disminuye la diversidad en los ecosistemas terrestres creando interacciones competitivas que conducen a cambios en su composición y proporcionando condiciones no favorables para algunas especies, que pueden afectar sus fases de regeneración. (25)

Las estacas doradas

La sugerencia de que los impactos humanos han orillado a la Tierra a tener las condiciones de un nuevo periodo geológicos, o “época”, ha sido uno de los conceptos de mayor influencia en la última década en la investigación geológica. La búsqueda de una estaca dorada es clave en el estudio del Antropoceno, la cual proveerá un punto de referencia único —escogido en algún lugar del planeta— que marca el inicio del Antropoceno y que puede ser formalmente definido como la Escala Geológica del Tiempo.

El empleo de límites para definir las unidades cronoestratigráficas (que son parte de la estratigrafía dedicada a estudiar las relaciones del tiempo respecto de la edad de las rocas) inició en 1960 y 20 años después se le dio el nombre de *Global Stratotype Sections Points* (GSSP), en el que dos puntos marcadores (estacas doradas) se emplean para definir la dimensión del tiempo geológico. (26)

El inicio del Holoceno quedó fijado en la línea que separa dos capas de hielo en las profundidades de Groenlandia y los geólogos que se han implicado en la defensa del Antropoceno han de buscar un punto de referencia para la nueva época: una “estaca dorada” visible en el registro fósil de la Tierra.

Para elegir una localidad tipo y definir un nuevo punto GSSP es necesario que el estrato tipo seleccionado cumpla ciertos criterios:

- El límite inferior debe definirse como el marcador primario. A menudo es la primera aparición de una especie de fósil pero puede ser otro tipo de marcador; por ejemplo, los radionucleótidos.

- Debe existir un segundo marcador; por ejemplo, otro tipo de fósil, trazas de químicos o evidencias de tipo geomagnéticas.
- El horizonte en el que aparece el marcador debe tener minerales que puedan datarse radiométricamente.
- El marcador debe ser independiente del sitio geológico donde se encuentra; por ejemplo, la aparición de plutonio se puede observar en los arrecifes de corales y en los estuarios
- También se pide que sean buenos afloramientos, que registren una sedimentación continua y que además se encuentren en lugares accesibles, para favorecer su estudio presente y futuro. Ésas son sólo algunas de las cuestiones que tiene que cumplir un punto GSSP, que, como son lugares de gran interés científico, inmediatamente se convierten en lugares protegidos. (26)

¿Una nueva estaca dorada?

En 2023 se anunció que el Lago Crawford situado en Canadá se proponía como un nuevo candidato GSSP que evidenciaba la era del Antropoceno. Al seleccionar el mencionado lago se dio una pauta significativa para intentar validar la hipótesis del Antropoceno y conducir a un reconocimiento científico, de validez geológica, tanto social como político, de la escala y la severidad de los procesos de transformación desencadenados por la industrialización.

Los marcadores generados por el hombre, tales como radionucleótidos artificiales, partículas provenientes de la combustión de fósiles, cambios en la población biótica y contaminantes orgánicos han sido detectados en las capas sedimentarias del fondo del lago que atestiguan la longevidad y la escala de cambios planetarios en una resolución anual.

Hay evidencias de los impactos botánicos producto de la agricultura a pequeña escala llevada a cabo por las comunidades entre los siglos XIII y XV, así como de la maceración de granos que se originó con la llegada de los europeos en el siglo XIX.

La propuesta ha sido sometida a la Comisión Internacional de Estratigrafía para su ratificación, aunque un eventual rechazo de la propuesta representaría el repentino fin del Antropoceno. La hipótesis no sólo cuenta con

avales científicos suficientes para ser tomada en serio, sino que apunta hacia una realidad que trasciende las propias fronteras de la geología.

No es necesario definir formalmente el Antropoceno como una época geológica para aceptar que la actividad humana ha cambiado los procesos del sistema terrestre de manera significativa durante los últimos siglos; tampoco para reflexionar sobre las implicaciones morales y políticas de esa profunda alteración. La figura 3 muestra un ejemplo de estaca dorada situada en Australia. A 2023 han sido aprobados 80 de los 104 GSSP que se han solicitado reconocer.

Figura 3. La estaca dorada más antigua ubicada en Australia



Teorías del inicio del Antropoceno

En los términos de la paleoantropología y tomando como guía algunas de las ideas manejadas por la Organización de Naciones Unidas en 2012, el Cuaternario vendría de la mano con la aparición de los primeros homínidos, miembros del género *Homo*, particularmente el *Homo habilis* (el hombre hábil, en alusión a su capacidad de producir instrumentos líticos). Las primeras herramientas y, por ende, los primeros signos de la existencia de una cultura de la talla de piedra se descubrieron en los años cincuenta del siglo

pasado, en los yacimientos de la garganta de Olduvai, cerca del volcán Serengeti (Tanzania)

A pesar de ello, no podemos considerar que estas actividades supusieran el comienzo de una afectación sistemática por parte de los primeros seres humanos sobre el medio ambiente, ni siquiera en lo que respecta a una complejidad importante de sus estrategias de subsistencia. Pocos accidentes han sido más fértiles en el plano simbólico que la explosión del reactor número 4 de la planta nuclear de Chernóbil, que tuvo lugar en 1986.

En su momento, la catástrofe se convirtió en una advertencia sobre los riesgos que para la especie humana comportan sus propias creaciones tecnológicas. Desde ese punto de vista, la central nuclear representa un renglón torcido en la ambigua historia de la modernidad: una advertencia sobre nuestra eterna condición prometeica. ¡Prohibido coger la manzana! (27)

Sin embargo, cuando parecía que su significado ya estaba cerrado se descubrió que algo nuevo había sucedido en Chernóbil durante los últimos 30 años; algo que ponía inesperadamente en relación ese lugar emblemático con el último episodio de la larga trayectoria humana: la llegada del Antropoceno. (27)

Varias fechas de inicio de la época del Antropoceno se han propuesto, reflejando diferentes perspectivas de las disciplinas que las proponen, así como los criterios concernientes a cuándo las sociedades empezaron a jugar un papel preponderante sobre los ecosistemas. El Antropoceno no comienza cuando los seres humanos por primera vez empezaron a modificar los ecosistemas, sino cuando tuvieron un papel preponderante en modificar la Tierra como un total.

Si se mira el Antropoceno bajo la óptica de la arqueología, es posible afirmar que “el comienzo del Antropoceno se puede definir en términos de cuando apareció la evidencia en los anales arqueológicos de la capacidad humana de llevar a cabo una geoingeniería del ecosistema”.

Bajo esa óptica hay quienes afirman que el Antropoceno no es nada más parte de un único complejo continuo de los últimos 50 000 años, debido “a la expansión geográfica humana”. A continuación se describen algunas de las teorías sobre el inicio del Antropoceno.

El advenimiento de la agricultura y la deforestación que han conducido a un incremento gradual de CO₂ y metano

La sugerencia se centra en la transición de las sociedades nómadas de cazadores, recolectores y pescadores hacia el establecimiento de sociedades permanentes dedicadas a la agricultura, que se produjo, según los conocimientos actuales, en el Creciente Fértil en el Cercano Oriente, conocida como la revolución neolítica. (10)

Este proceso de ninguna manera fue una revolución en el sentido de un cambio súbito en el orden social, sino una verdadera transformación: los seres humanos alteraron grandes porciones del paisaje e intervinieron en el acervo genético natural mediante el cultivo de plantas y la domesticación de animales en una escala sin precedentes. (10)

La “invención” de las sociedades sedentarias, la agricultura y la cría de animales y plantas estaba estrechamente vinculada con las nuevas tecnologías: la cerámica horneada hizo posible almacenar productos agrícolas para su uso posterior. La mejora de las herramientas de piedra y las innovaciones en los métodos de construcción proporcionaron una base para los asentamientos permanentes.

La invención del arado hizo posible el trabajo de surcar la tierra para el cultivo y aumentar la productividad. La revolución neolítica dejó huellas detectables en el registro geológico. Innumerables elementos de evidencia de palinología, arqueología, geología, historia y antropología cultural apoyan la tesis de que las alteraciones humanas en el paisaje de Eurasia comenzaron durante la Edad de Piedra tardía y ganaron un nuevo atributo durante las edades de Bronce y Hierro.

El intercambio de especies entre los continentes que continuaron después del viaje de Cristóbal Colón

Otra propuesta de datación que en su tiempo recibió mucha atención en los medios de comunicación masiva fue la relacionada con un artículo publicado por S. Lewis y M. Maslin, científicos británicos que argumentaron que

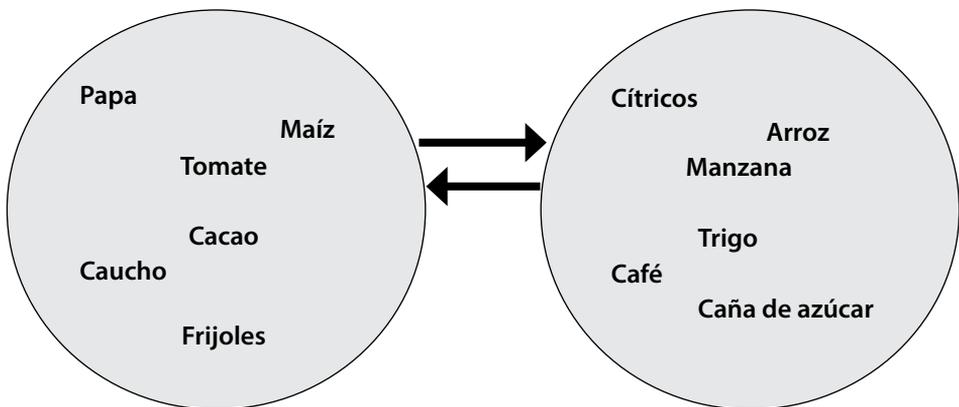
la fecha del comienzo del Antropoceno puede ubicarse a principios del siglo XVII. Se basaban en las consecuencias de la llegada de los españoles a América pues había tenido un efecto global que podía ser identificado. (28)

El análisis del núcleo de hielo mostró una disminución en los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera de la Tierra en 1610. Su causa era un efecto retardado de la llegada de los europeos al continente americano cuya colonización causó la muerte de unos 50 millones de habitantes como resultado de la guerra y las enfermedades introducidas por los conquistadores. La caída dramática de la población significó que grandes extensiones de tierra que anteriormente se cultivaban quedaran sin explotar y nuevamente se convirtieran en selva.

Este aumento de la vegetación capturó enormes cantidades de dióxido de carbono. Que un impacto de este tipo sirva como un marcador del comienzo del Antropoceno es algo severamente cuestionado por muchos geólogos. Sin embargo, esta teoría no muestra numéricamente que el descenso del dióxido de carbono haya cambiado el funcionamiento de la Tierra.

Muchos científicos llaman la atención en el sentido de que en el Holoceno preindustrial hubo descensos similares en la concentración de CO₂ y de que el rango que se pregona de disminución de 10 partes por millón se encuentra dentro de la variabilidad natural en el Holoceno. La figura 4 muestra el intercambio agrícola que se dio entre ambos continentes.

Figura 4. *El intercambio de productos agrícolas entre América y Europa*



El inicio de la Revolución industrial en 1800 (29)

Las consecuencias de la Revolución industrial fueron tremendas e irreversibles en la historia de la humanidad. Entre ellas podemos enumerar las siguientes:

- *Cambio radical del modelo de vida.* Las mejoras en los sistemas de producción y de comercio sentaron las bases de la producción en masa de bienes, lo cual significó la aparición de nuevos empleos y la generación de riquezas en masa. Esto incidió en el aumento de la natalidad y de la esperanza de vida (explosión demográfica), así como en un notorio éxodo rural hacia las urbes.
- *Nuevos transportes.* La tecnología a vapor, inicialmente, y luego el motor de combustión y la electricidad, permitieron nuevos métodos de transporte que redujeron significativamente los tiempos de espera por la mercancía y permitieron la movilidad humana a velocidades jamás sospechadas.
- *Aparición de las ideologías de izquierda.* El predominio de la burguesía como dueña de los medios de producción, y su explotación de la mano de obra de los obreros industriales y campesinos empobrecidos, marcó el surgimiento del sindicalismo, el socialismo, el anarquismo y el comunismo.

El inicio del Antropoceno, producto de la Revolución industrial, sugerido inicialmente por Crutzen, ha sido favorecido por científicos sociales e identifica al Antropoceno en las formas capitalistas de la producción económica y ecológica, particularmente por sus formas de trabajo y por sus innovaciones tecnológicas.

Lo anterior lo describe Charles Dickens (1954) en su obra *Tiempos difíciles (Hard Times for These Times)*, mostrando una visión inolvidable de la Inglaterra victoriana sumida en la Revolución industrial.

En Coketown no se veía por ninguna parte cosa que no fuese rigurosamente productiva. Era una ciudad de ladrillo rojo, es decir, de ladrillo que habría sido rojo si el humo y la ceniza se lo hubiera consentido: como no era así, la

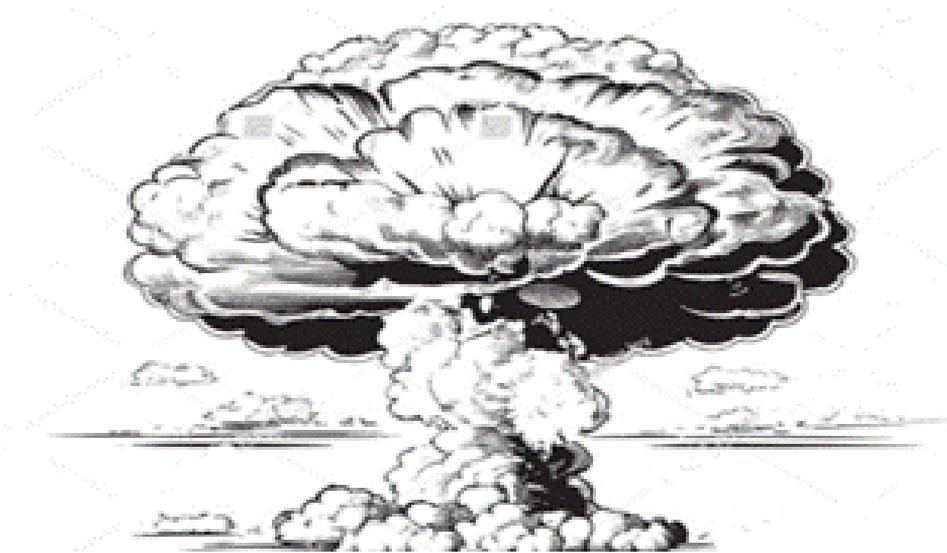
ciudad tenía un extraño color rojinegro. Era una ciudad de máquinas y de altas chimeneas, por las que salían interminables serpientes de humo que no acababan nunca de desenroscarse a pesar de salir sin interrupción. Pasaban por la ciudad un negro canal y un río de aguas teñidas de púrpura maloliente; tenía también grandes bloques de edificios llenos de ventanas, en cuyo interior resonaba todo el día un continuo traqueteo y temblor y en el que el émbolo de la máquina de vapor subía y bajaba con monotonía, lo mismo que la cabeza de un elefante enloquecido de melancolía. Contenía la ciudad varias calles anchas y estrechas parecidas; estaban habitadas por gente que también se parecía entre sí, que entraban y salían de sus casas a idénticas horas, levantando en el piso idénticos ruidos de pasos, que se encaminaban hacia idéntica ocupación y para los que cada día era idéntico al de ayer y al de mañana. (30)

El carácter revolucionario de la industrialización, como una sola vía de transformación para producir bienes, elevó la temperatura del dióxido de carbono en la atmósfera. Sin duda la Revolución industrial fue uno de los cambios más significativos en los efectos del hombre sobre el medio ambiente. Sin embargo, vale decir, durante los siglos XVIII y XIX la Revolución industrial realmente sólo ocurrió en Europa y en Norteamérica; otras partes del mundo se industrializaron más tarde.

Comienzo de la era atómica (31)

El año 1945 se ha propuesto como el inicio del Antropoceno debido a que marca la explosión de la primera bomba atómica, que da inicio a un periodo de pruebas atmosféricas, cuyos resultados que se ven en la presencia de radionucleótidos en hielos y lagos (figura 5). Los radios nucleótidos en los núcleos se pueden considerar como una señal estratigráfica que coincide mucho con lo que se ha llamado la gran aceleración del impacto humano en el sistema terrestre. La señal es muy evidente en los depósitos entre 1952 y 1960, años de extensivas pruebas nucleares.

Los residuos de las bombas se pueden trazar por las relaciones de plutonio 239 y 240 que tienen la habilidad de absorberse en caolines y compuestos orgánicos de los sedimentos marinos, huella que será medible en

Figura 5. *La era atómica*

sedimentos de 100 000 años futuros. Pero no es solamente en el ambiente donde se detectan las huellas de las detonaciones, pues el cuerpo de cada persona en el mundo contiene estroncio 90, un producto proveniente de las detonaciones. Durante las primeras etapas de la Guerra Fría (1950 y 1960) se detonaron aproximadamente 1500 bombas atómicas.

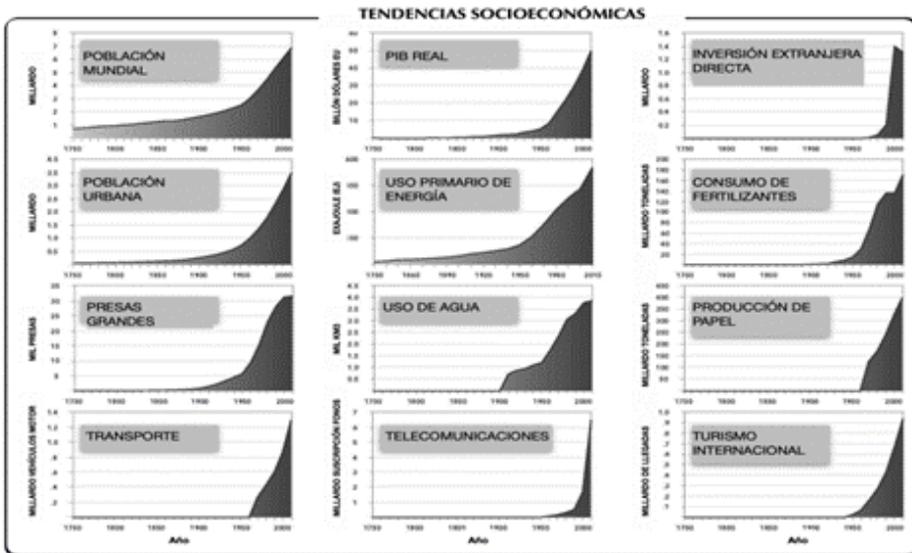
También las bombas producen “nucleidos radiogénicos” que se depositan en la atmósfera, los cuales se detectan como carbono radioactivo (carbono 14). Una vez que cesaron las pruebas, el carbono 14 regresó a sus niveles normales. Si bien las pruebas nucleares resultan en buenos marcadores, desde el punto de vista geológico no ha sido un evento que cambie al mundo. Existe una profunda relación entre las armas nucleares y el medio ambiente en el Antropoceno. Las armas nucleares son perjudiciales para el desarrollo humano y ponen en peligro los sistemas ecológicos de los que depende la humanidad.

“La Gran Aceleración” de población e industrialización de mediados del siglo xx

Desde 1950 la influencia de la actividad humana en el planeta se ha incrementado significativa. Esta “Gran Aceleración” está marcada por un incremento de la población, cambios en los procesos naturales y el desarrollo de nuevos materiales, desde minerales hasta plásticos, seguidos de compuestos orgánicos e inorgánicos contaminantes persistentes, aunado a la gran interconectividad mundial.

La notable discontinuidad de la empresa humana a mitad del siglo xx define la segunda etapa del Antropoceno. La aceleración prácticamente de todo se muestra en el cuadro 3. La población se ha triplicado, pero la economía global y el consumo han crecido muchas veces más. La conectividad de la humanidad ha crecido a un ritmo exorbitante desde 1950, como puede verse en la inversión extranjera directa, en el turismo internacional y en el número de vehículos y teléfonos.

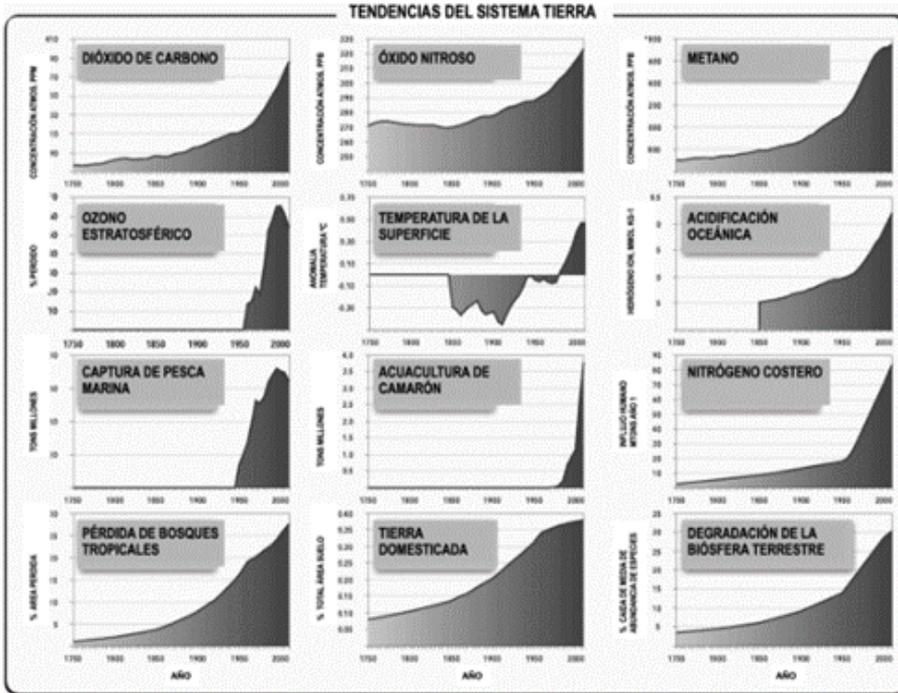
Cuadro 3. Parámetros socioeconómicos de la Gran Aceleración



Steffen, Crutzen y el historiador ambiental McNeill (32) acuñaron el término “Gran Aceleración” para referirse a los dramáticos cambios socio-

ambientales posteriores a 1950. En el artículo de una revista titulado provocativamente “El Antropoceno: ¿están los humanos ahora abrumando a las grandes fuerzas de la naturaleza?”, Steffen, Crutzen y McNeill publicaron los gráficos de la Gran Aceleración (cuadro 4) y sugirieron que se debería considerar la segunda mitad del siglo xx como la segunda etapa del Antropoceno.

Cuadro 4. Tendencias del Sistema Tierra de la Gran Aceleración



En el artículo decían:

Durante los últimos 50 años, los seres humanos han cambiado los ecosistemas del mundo de manera más rápida y extensa que en cualquier otro periodo comparable de la historia de la humanidad. La Tierra se encuentra en su sexto gran evento de extinción, con tasas de pérdida de especies que aumentan rápidamente para los ecosistemas terrestres y marinos. Las concentraciones atmosféricas de varios gases de efecto invernadero importantes han

aumentado sustancialmente y la Tierra se está calentando rápidamente. Ahora se convierte más nitrógeno de la atmósfera en formas reactivas mediante la producción de fertilizantes y la combustión de combustibles fósiles que por todos los procesos naturales en los ecosistemas terrestres juntos. (32)

¿Hay un buen Antropoceno?

Algunos investigadores climáticos hablan de un Antropoceno “bueno” y otros de uno “malo”. Este último describe la intensificación y quizás la aceleración del inintencionado trastorno que la humanidad está infligiendo a los ecosistemas de los que dependemos. El primero, en cambio, corresponde a una situación en la que se acepta nuestro papel como soberanos colectivos de la Tierra y empezamos a influir y a coordinar los procesos planetarios orientados al florecimiento humano.

Pero no podemos alcanzar ese valioso objetivo sin una planificación democrática de la economía y sin imponernos progresivamente al mercado. La escala de lo que queda por delante —los diferentes procesos biogeofísicos que debemos entender, registrar y dominar para prevenir los peligros del cambio climático y otras amenazas relacionadas con él— es insondable. No podemos confiar en un mercado, no planificado e irracional, caracterizado por unos incentivos perversos, en lo que a coordinar ecosistemas se refiere.

Contrarrestar el cambio climático y planificar la economía son dos tareas cuya ambición es comparable: si podemos administrar el sistema terrícola, con todas sus variables y su miríada de procesos, también podremos administrar la economía a escala global.

Para mover la empresa humana hacia una relación sustentable con y dentro del sistema terrestre se requiere algo más que meros retoques y cambios incrementales. En lugar de eso, se necesita una salida radical del *statu quo* donde los sistemas complejos de sustentabilidad entrelazada se confrontan con el fin de variar las trayectorias no sostenibles hacia un “buen” Antropoceno.

Ese mejor Antropoceno se basa en que se alcancen objetivos sustentables que incluyen las estructuras políticas y económicas. Se requiere invertir en

conocimiento, tecnología, instituciones y modos de hacer negocios, así como un comportamiento personal y sociocultural que tenga significado.

Timon McPherson, ecologista, y colaboradores proponen cinco principios como condición necesaria para una transformación social que conduzca a un buen Antropoceno, uno que es justo, equitativo, resiliente y sustentable. Estos principios incluyen el repensar el crecimiento, la eficiencia, el Estado, los bienes comunes y la justicia. Tal vez la lectura de lo que escribió Crutzen ha sido tergiversado por aquellos que piensan que el Antropoceno es una nueva época a la que hay que darle la bienvenida y seguir adelante. (33)

Hay quienes ven la época actual como una en la que impera el “buen” Antropoceno: Un buen Antropoceno demanda que los seres humanos usen el crecimiento social y económico y el poder de la tecnología para proveer una vida mejor para la gente, estabilizar el clima y proteger el mundo natural. Los “ecomodernistas” dan la bienvenida a una nueva época como signo de la habilidad humana de transformar y controlar,

Los ecomodernistas no aceptan que hay límites planetarios naturales que restringen la expansión humana; responden que “los sistemas humanos se pueden adaptar y de hecho prosperar en un mundo caliente porque la historia y nuestra ingenuidad técnica prueba nuestra flexibilidad”.

Negación colectiva

¿Por qué nos negamos a ver la situación real? Entre otras, por las siguientes razones: la fe ciega en el progreso y el desarrollo, esto es, en un sistema que aumenta sin cesar la cantidad de riquezas disponibles, y la creencia en la capacidad de la ciencia y la tecnología para resolver cualquier problema y todo fenómeno atribuido a causas externas.

Por ejemplo, en la contaminación existen poderosos intereses que sacan provecho de la dinámica y ejercen presiones intensas, o la colonización de la mentalidad de los consumidores por parte de los medios informativos que provocan un ansia de consumo individual para obtener comodidades, distinguirse de los demás y conseguir un reconocimiento social.

Es sorprendente que las ciencias humanas y sociales no hayan abordado durante mucho tiempo esta problemática, a pesar de ser determinante para

el futuro de la humanidad. La pasaron por alto porque, además de ser antropocéntricas por definición, estas ciencias estimaban que se trataba de un ámbito de investigación *per se* de las ciencias naturales.

La aparición del concepto de Antropoceno les ha conferido ahora la responsabilidad de examinar y explicar cómo las sociedades humanas han podido provocar cambios de tan gran magnitud en el *modus operandi* del planeta y cuál es el impacto diferenciado de cada una de ellas en el mundo.

Las ciencias humanas y sociales tendrán que elaborar y dominar instrumentos y conocimientos inéditos para responder a los problemas planteados por esta nueva era de la humanidad: desastres de la naturaleza, energías renovables, agotamiento de recursos naturales, desertificación, ecocidios, contaminación generalizada, migraciones, injusticias sociales y medioambientales, etcétera.

También sorprende la lentitud y el apocamiento de las reacciones de los dirigentes políticos y de las sociedades en general. Un análisis matemático de las redes de referencias muestra que desde principios del decenio de 1990 ya existía un consenso sobre el cambio climático en los artículos científicos dedicados a este tema.

Por eso, teniendo en cuenta el agravamiento de la situación, no se acierta a comprender por qué son tan poco audaces los esfuerzos realizados para reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero. ¿Qué obstáculos impiden que las negociaciones internacionales sean más eficaces? Dejando aparte la intencionalidad de esos obstáculos, no cabe duda de que en lo referente al cambio climático por lo menos la comunicación entre el mundo de la ciencia y la sociedad carece de fluidez.

¿Hay solución?

Para hacer frente a los problemas del Antropoceno, uno de los principales escollos con que se tropieza es la necesidad de resolver la delicada cuestión de la justicia medioambiental. En efecto, el cambio climático va a crear nuevos peligros y aumentar los que ya se ciernen sobre los ecosistemas naturales y humanos.

Ahora bien, esos riesgos están desigualmente repartidos y en general afectan más a las personas y a los grupos desfavorecidos. Sin embargo, no resulta fácil encontrar una solución a este problema, habida cuenta de lo heterogéneos que son los países en función de su nivel de desarrollo, extensión territorial, población, recursos naturales, etc. Además, la huella ecológica humana sobrepasa en 50% la capacidad de regeneración y absorción del planeta y 80% de la población mundial vive en países cuya capacidad biológica ya es menor que su huella ecológica.

Una porción importante de la huella ecológica procede de la exportación de productos primarios causantes en buena medida de la deforestación. El sistema competitivo mundializado busca por doquier abastecimientos al menor costo, fomentando así una extracción abusiva de recursos naturales en muchos países y el acaparamiento de tierras en otros.

Si fuera posible suprimir desde ahora la totalidad de las emisiones de dióxido de carbono de los países de ingresos altos, no sería suficiente para reducir la huella de carbono mundial y no sobrepasar los límites impuestos por la biosfera hasta 2050.

En otras palabras, a pesar de las grandes diferencias de desarrollo económico y riqueza de recursos naturales existentes entre los países del mundo, todos ellos tendrán que esforzarse por solucionar el problema más apremiante de la época del Antropoceno y reducir en proporciones drásticas sus emisiones de gases de efecto de invernadero. Pero aquí entramos en el callejón sin salida que reaparece continuamente en todas las negociaciones internacionales: “la caza de culpables”.

Debido a ello, los países se resisten a contraer compromisos para no hacer peligrar su crecimiento y su tasa de empleo, y también para no ir en contra de intereses sumamente poderosos. La solución encontrada con la firma del Acuerdo de París consistió en pedir a los países que contrajeran compromisos voluntarios, en vez de imponerles criterios establecidos a nivel mundial.

Esto es, se propuso que cada país se comprometiera a alcanzar determinados objetivos en materia de reducción de emisiones de gases que fuesen acordes con lo que estimaba viable. Gracias a este planteamiento se pudieron evitar los callejones sin salida y posibilitar la puesta en marcha de acciones, pero también se creó una confusión en los criterios de evaluación que va a complicar la tarea de comparar los esfuerzos realizados por cada país.

Además, a pesar de su alcance universal, este acuerdo internacional no prevé sanción alguna contra los países que no cumplan los compromisos contraídos. Esto revela cuán endeble es la gobernanza del cambio climático.

En efecto, como se carece de una institución dotada de un mandato preciso para ejercerla, es muy arduo imponerse a los intereses económicos de los países y de las empresas. A los gravísimos problemas medioambientales de la época del Antropoceno no se les otorga la debida prioridad en los proyectos y programas de las sociedades del mundo entero. Parece como si la humanidad estuviera viendo aletargada una película y esperando que en la secuencia final aparezcan los héroes.

La biosfera

El vocablo “biosfera” fue elevado a la categoría de concepto por el geoquímico Vladimir Vernadsky quien propuso que, además del conjunto de los organismos vivos terrestres, la biosfera integrara todas las interacciones de éstos con el aire, el agua y el suelo que nutren la vida orgánica e incorporase también la energía solar que la alimenta en gran parte. (34)

La biosfera es, por consiguiente, algo más que la mera suma de sus diferentes partes, ya que integra su interrelación y su superposición con las demás esferas terrestres, conservando al mismo tiempo su propia dinámica y sus propiedades emergentes.

La tecnosfera

En un brevísimo instante de la escala temporal geológica ha hecho su aparición una nueva esfera de la Tierra. Su peso asciende a 30 billones de toneladas y comprende el dióxido de carbono emitido por la industria hacia la atmósfera, que por sí solo equivale al volumen de 150 000 pirámides de Egipto. Su nombre: la tecnosfera.

La tecnosfera es un concepto elaborado por el ingeniero y geólogo Peter Haff. Lo mismo que el Antropoceno, la tecnosfera es un concepto controvertido, aunque sólo sea por la función limitada que asigna al ser humano. En

efecto, indica que colectivamente distamos mucho de gozar de la libertad que creemos tener para pilotar el sistema terrestre. (35)

La tecnosfera abarca el conjunto de objetos tecnológicos producidos por la humanidad. En efecto, la tecnosfera es todo un sistema y dista mucho de ser un mero conglomerado de aparatos y equipamientos tecnológicos. Esta distinción, que es esencial, se puede explicar si hacemos una comparación con el concepto más consolidado de biosfera. De la misma manera, la tecnosfera no la componen solamente nuestras máquinas, sino también nosotros mismos, los seres humanos, y todos los sistemas sociales y profesionales que permiten interactuar con la tecnología: fábricas, escuelas, universidades, bancos, sindicatos, partidos políticos e internet.

También la componen: los animales domésticos que criamos en cantidades enormes para alimentarnos; las plantas que cultivamos para nuestro sustento y el de nuestros animales, y los suelos agrícolas cuyo estado natural hemos modificado en gran parte para el cultivo de esas plantas.

La tecnosfera engloba también carreteras, redes ferroviarias, aeropuertos, minas y canteras, campos de petróleo y gas, ciudades y obras hidráulicas. Todos esos componentes han generado ingentes cantidades de desechos que se acumulan en vertederos y contaminan el aire, el suelo y el agua.

A lo largo de toda la historia humana ha existido evidentemente una “prototecnosfera”, pero la mayor parte del tiempo en forma de núcleos fragmentarios, aislados y dispersos, sin gran importancia a escala planetaria. En cambio, actualmente la tecnosfera se ha convertido en un sistema mundialmente interrelacionado que entraña una evolución nueva y decisiva para nuestro planeta.

¿Qué tamaño tiene la tecnosfera? Se puede calcular *grosso modo* evaluando la masa de sus componentes físicos: desde las ciudades y el volumen de tierras excavadas y arrasadas para construir sus cimientos hasta las tierras agrícolas, las carreteras, las redes ferroviarias, etc. Una estimación por orden de magnitud ha cifrado en unos 30 billones de toneladas los materiales que los hombres utilizan, o han utilizado y desechado, en el conjunto del planeta. Los elementos físicos de la tecnosfera también son muy variados.

Nuestros antepasados fabricaron utensilios sencillos como las hachas de piedra hace millones de años. Sin embargo, desde de la Revolución indus-

trial, y más concretamente después de la “Gran Aceleración” del crecimiento demográfico, la industrialización y la mundialización en el siglo xx, la proliferación de máquinas y objetos manufacturados de todas clases ha venido cobrando proporciones gigantescas.

Además, las tecnologías avanzan a un ritmo cada vez más rápido. Nuestros antecesores de la era preindustrial no vieron muchos cambios tecnológicos de una generación a otra. En cambio, hoy, en el intervalo de algo más de una generación humana, el uso del teléfono móvil —para citar solamente un ejemplo— se ha generalizado masivamente entre casi todas las franjas de edad de la población.

Hay un aspecto fundamental que distingue a la tecnosfera de la biosfera. Esta última recicla a la perfección los materiales que la componen y este reciclaje le ha permitido perdurar en la Tierra durante miles de millones de años. En cambio, la tecnosfera no recicla prácticamente casi ninguno de sus componentes. Algunos de sus desechos son demasiado visibles, como, por ejemplo, las montañas de plásticos que se acumulan en los mares y las playas del mundo entero.

El ya mencionado Peter Haff hace hincapié en que somos sobre todo componentes del sistema terrestre y, por lo tanto, nos vemos obligados a mantenerlo en funcionamiento porque es el que proporciona a la humanidad los alimentos, las viviendas y otros recursos que garantizan su supervivencia. Hoy en día no hay ninguna fuerza humana que controle la evolución de la tecnosfera, porque su desarrollo obedece a la invención y a la aparición de nuevas tecnologías útiles.

Nos hallamos en presencia de una especie de evolución conjunta de los sistemas humanos y tecnológicos. Se puede considerar que actualmente la tecnosfera es un parásito de la biosfera que trastoca la habitabilidad de la Tierra. Entre las consecuencias evidentes de esto figuran el aumento y la aceleración de la extinción de especies vegetales y animales, así como las alteraciones del clima y de la composición química de los océanos que resultan ser perjudiciales para los grupos biológicos existentes.

Todos estos cambios pueden deteriorar el funcionamiento de la biosfera y causar daños a las poblaciones humanas. Por eso lo ideal sería que los seres humanos tratáramos de contribuir a que el desarrollo de la tecnosfera sea más sostenible a largo plazo. Sin embargo, a la humanidad, en su con-

junto, no le queda otro remedio que mantenerla en estado de funcionamiento porque se ha hecho indispensable para su existencia.

Uno de los retos que nos plantea la tecnosfera en proceso de transformación es calcular el margen de maniobra de que disponemos en el contexto actual para emprender una acción eficaz en el plano socioeconómico y político. “El primer paso que debemos dar para afrontar ese reto es tratar de conocer mejor el funcionamiento de este nuevo periodo extraordinario de la evolución de nuestro planeta. Queda todavía mucho por hacer a este respecto nos dice el geólogo Jan Zalasiewicz”. (36)

Descripción literaria de un planeta sin humanos

El Antropoceno comienza a ser tan ampliamente conocido que genera una crisis en las humanidades. Si únicamente estamos descubriendo las consecuencias ecológicas de ciertas acciones humanas y dándonos cuenta por primera vez de las implicaciones de decisiones pasadas, ¿deberíamos entonces rehacer o revisar nuestra comprensión de la historia? ¿Cómo cambia la manera como percibimos la historia? ¿Cómo leemos los textos que una vez parecieron que tenían poco que decir acerca del medio ambiente, pero que ahora se muestran unidos a la historia de la explotación del planeta?

El término “posterior a los humanos” fue muy poco empleado antes de mediados de 1990, aunque la visión de varios tipos de sucesores de la especie humana se ha imaginado cómo es el caso de las máquinas inteligentes en el libro de Samuel Butler *Erewhon* de 1872. Si bien las observaciones de Darwin acerca del cambio continuo de las especies y su extinción lógicamente dieron pie a la idea de que los seres humanos se desarrollaban o eran desplazados por un algo que conduciría a una etapa “posterior a los humanos”, no fueron de mucha discusión pública.

Aunque buena parte de la literatura tiene la idea de que los humanos serán efectivamente inmortales, puesto que la tecnología les permitirá colonizar otros planetas, unos cuantos escritores han explorado la idea de una Tierra sin humanos.

La primera fue Mary Shelley en su novela *The Last Man*, en la cual un hombre se pasea por la Tierra después de que una plaga destruye la vida humana. H. G. Wells, en su novela de 1895, *The Time Machine*, describe un tiempo en que toda traza de humanidad se ha perdido y criaturas parecidas a los cangrejos viven a la luz de un Sol moribundo.

Douglas Dixon fue más allá, imaginando cómo los organismos existentes podían evolucionar en *A Zoology of the Future*, donde expande la idea de Kurt Vonnegut en su libro *Galápagos*, según el cual la humanidad se convierte en un ser irracional.

Posiblemente el tratamiento de la extinción humana más realista sea el de la serie de televisión *Star Trek* en su episodio de 1992 que narra la extinción de las especies humanoides conforme su mundo y su sol extinguen toda vida del sistema planetario. La conclusión de estos escritores que se adentraron a imaginar la evolución humana converge en imaginar que la tecnología puede permitir temporalmente la extinción; sin embargo, ésta será inevitable.

¿Qué pasa si desaparecemos del planeta?

Mientras que los conceptos de la extinción de los humanos —desde la religión apocalíptica hasta los discursos evolutivos darwinianos— eran capaces de imaginar una extinción como un evento grandioso y prometedor de algo mejor, la extinción en el Antropoceno se figura como un momento de profunda y abyecta pérdida; es decir, que la pérdida no es solamente de seres humanos sino también de una configuración capitalista de confort y consumo.

Sin embargo, ha sido una pandemia mundial lo que ha provocado que todas las alarmas sonaran y que nos viésemos obligados a suspender momentáneamente el modo de vida que llevábamos. La crisis del coronavirus nos ha servido para entender que no somos omnipotentes y que ni mucho menos tenemos el control sobre todo lo que nos rodea. No hace falta que ocurra una invasión alienígena o que caiga un meteorito: tan simple y microscópico como un virus puede poner todo “patas arriba”. ¿Qué pasaría si de verdad el ser humano se extinguiera?

Lógicamente, esto no podría ocurrir de la noche a la mañana, salvo que un meteorito chocase con nuestro planeta, como sostienen muchos teóricos sobre el fin de los dinosaurios. En cualquier caso, nuestra existencia en la Tierra es apenas un suspiro si la comparamos con la del resto de las especies y el tiempo estelar. Uno de los autores que más han reflexionado sobre esta remota (pero no tan loca) posibilidad es Alan Weisman, quien escribió un libro en el mundo de la ciencia especulativa titulado *El mundo sin nosotros*. (37)

Profesor asociado de periodismo, ha visitado los lugares clave del planeta y hablado con expertos de todo tipo que explican cómo las enormes infraestructuras se hundirían y finalmente desaparecerían sin dejar rastro.

Cuánto tardarían las principales ciudades del planeta en reforestarse y las llanuras africanas en recuperar el esplendor de su fauna; por qué algunas de nuestras construcciones más antiguas podrían ser las últimas en desaparecer y cuáles de nuestros objetos cotidianos quedarían inmortalizados como fósiles de plástico indestructibles, gatos domésticos que se convierten en depredadores de éxito, plagas urbanas como las ratas o las cucarachas que desaparecen sin la presencia del hombre y estatuas de bronce que perviven milenios, son sólo algunos de los eventos que podrían suceder.

¿Cómo reaccionaría el planeta ante una extinción completa e instantánea de la humanidad sin ningún efecto destructivo en nuestro ambiente? En pocas palabras, simple y llanamente dejamos de existir. Dice Weisman que

aunque es una premisa tétrica y muy poco previsible, pienso que la humanidad, si tiene que desaparecer será mediante un proceso más o menos dilatado en el tiempo y probablemente con varias generaciones afectadas a la vez, o alternativamente una catástrofe natural de dimensiones bíblicas nos da una perspectiva, un espejo para ver nuestra actual influencia en el ecosistema viendo cómo repercutiría en la naturaleza que el ser humano dejara de repente de generar presión en nuestro mundo. (37)

Ríos en las ciudades

Según Weisman, (37) las metrópolis serían unos de los primeros entornos en notar los efectos de nuestra desaparición. Como es lógico, resulta que

es el ambiente en el que estamos inmersos la mayor parte de los humanos desde la primera Revolución industrial, por lo que no es de extrañar que a las pocas horas de que nos extinguiésemos todo cambiase de repente. Lo hemos visto en pequeñas dimensiones con la crisis del coronavirus: al vaciar las calles momentáneamente, contemplamos escenas en las que los animales campaban a sus anchas por los lugares más poblados.

Durante los inviernos, las aceras se agrietarían, haciendo nuevos nichos para que las semillas de los árboles echaran raíces. Los trenes subterráneos de las grandes ciudades tardarían una media de 36 horas en inundarse. Sin gente que hiciese funcionar las bombas que llevan el agua de las lluvias a las cañerías subterráneas, y el aumento exponencial de las lluvias, otra de las primeras consecuencias del fin de nuestra especie sería la proliferación de incendios por todas partes.

Las fallas en las refinerías de petróleo y en las plantas nucleares quedarían descontroladas sin supervisión humana. Del mismo modo, hay que pensar en todos nuestros desechos y en toda nuestra basura. La mayoría de ellos serían plásticos, que probablemente persistirían durante miles de años con efectos muy nocivos para la vida silvestre y para la naturaleza.

Seguramente, si en unos cuantos miles o millones de años hemos desaparecido y por fin se dignan a aparecer aquellos seres estelares que siempre aparecen en las narraciones de ciencia ficción de nuestra época, se encontrarían nuestras bolsas de plástico como legado de nuestra civilización. A medida que fueran pasando los meses y los años, las ciudades quedarían abandonadas a su suerte y condenadas a su fin.

Haciendo una pequeña cronología a partir del día de la desaparición tenemos ejemplos para hacerse una idea. Dice Weisman:

- *A los siete días.* Los generadores diésel que impulsan el agua de los circuitos de refrigeración de los reactores nucleares se quedarían sin combustible y el mecanismo se detendría.
- *Al primer año.* Los 1000 millones de pájaros que mueren cada año en todo el mundo sobrevivirían gracias al fallo de las luces de localización de las torres de comunicación y a la inanidad de los cables de alta tensión.

- *A los 10 años.* El tejado con la grieta que ya tenía goteras hace una década habría desaparecido hace tiempo.
- *A los 100 años.* Las poblaciones de pequeños depredadores, mapaches, comadrejas y zorros disminuirían por culpa del legado humano: los gatos asilvestrados desestabilizarían la cadena trófica.
- *A los 300 años.* Los puentes se derrumbarían. Los diques de todo el mundo se anegarían, se inundarían y se vendrían abajo. Ciudades, construidas en los deltas de los ríos, serían arrastradas por las aguas.
- *A los 1000 años.* Cualquier construcción que quedara en pie acabaría finalmente convertida en un inmenso bloque de hielo.
- *A los 35 000 años.* El suelo quedaría limpio del plomo depositado durante la era de la industrialización (el cadmio desaparecería al cabo de 75 000 años). Después de cientos de miles de años, aparecerían microbios capaces de biodegradar el plástico.
- *A los 100 000 años.* El CO₂ volvería a los niveles previos a la aparición del ser humano (puede ser que incluso tardase más).
- *A los 3 000 millones de años.* Aunque en formas inimaginables para nosotros, la Tierra seguiría siendo un planeta con vida.
- *Más de 5 000 millones de años.* El Sol, en su fase de gigante roja, se expandiría y engulliría a los planetas más cercanos, entre ellos a la Tierra.

La llegada de la “megafauna”

¿Cómo afectaría a la fauna si desaparecemos del planeta Tierra? Al igual que en los tiempos en los que todavía no habíamos colonizado el mundo y llegado a todas partes, los animales serían los auténticos reyes del ecosistema. Efectivamente, antes solía haber animales gigantes en cualquier parte y sin nosotros volverían a ser monumentales. Las investigaciones apuntan que sería el centro de Estados Unidos y algunas partes de América del Sur las zonas más ricas en estas especies de “megafauna”.

¿Cuánto tiempo tardaría la Tierra en recuperar esa biodiversidad que nosotros con nuestra industria hemos desequilibrado? Aunque el planeta volviese a contener mucha biodiversidad y la vegetación ganase la partida,

habría que contar con los efectos del cambio climático, el cual no deja de ser otro de nuestro legado al futuro.

El impacto de éste sería muy difícil de ponderar, ya que habría explosiones en plantas industriales o expulsiones de petróleo que continuarían calentando al mundo mucho después de nuestra partida, expulsando gases a la atmósfera que quedarían atrapados por el efecto invernadero.

El dióxido de carbono es absorbido por los océanos, así como por la vida vegetal. Los niveles actuales de este gas podrían tardar miles de años en eliminarse completamente de la atmósfera si la extinción fuera hoy mismo. Además, hay que contar que si el calentamiento es continuo, éste produciría el derretimiento de los bloques polares de hielo, lo que conllevaría más liberación de este gas debido al ablandamiento del permafrost, la capa de hielo subterránea más profunda de la Tierra.

Pero frente a tanta alarma, Weisman se muestra optimista:

Durante el periodo jurásico habría cinco veces más dióxido de carbono que en la actualidad, lo que llevó a un aumento exponencial de la acidez del océano [explica] Sin embargo, debió haber especies marinas que se enfrentaron y superaron estas condiciones extremas, evolucionando hasta formar parte del planeta que conocemos hoy en día. Lo que quiere decir que, en última instancia, y a pesar de los cambios extremos, la naturaleza siempre encuentra su camino.

De hecho, el Antropoceno podría acabar siendo un periodo insólitamente breve de la historia geológica, ya que existe la posibilidad de que termine con la desaparición irreversible de la civilización humana. No tiene por qué ser así.

La irrupción del Antropoceno todavía podría venir a señalar el inicio de una nueva relación sostenible entre los seres humanos y el planeta. Podría constituir el periodo en el que se aprenda a trabajar de manera concordante con la naturaleza en lugar de hacerlo en su contra, un periodo en el que desaparezcan en gran medida las diferencias entre lo natural y lo gestionado, ya que nos habremos convertido en atentos administradores de la Tierra entera, tras haber apelado a la extraordinaria resiliencia del mundo natural para lograr que nos ayude a recuperar la biodiversidad que un día tuvo, pese a haberla puesto al borde del abismo.

Al final, seremos nosotros quienes decidamos qué versión del Antropoceno habrá de desarrollarse ante nuestros ojos. Puede ser que los seres humanos seamos criaturas ingeniosas, pero también es verdad que somos belicosos. Las guerras y las luchas por la hegemonía entre las naciones han presidido siempre nuestros libros de historia.

Sin embargo, está claro que no podemos continuar por ese camino. Los peligros a los que hoy se enfrenta el conjunto del planeta son globales y solamente podrán abordarse con éxito si los países dejan a un lado sus diferencias y se unen para actuar de común acuerdo.

El *Homo sapiens*, es decir, el “humano sabio”, ha de aprender de sus errores y hacer honor a su nombre. Las personas que vivimos en el momento presente tenemos ante nosotros la formidable tarea de garantizar que la especie continúe viva en el futuro. No debemos perder la esperanza.

Todos contamos con las herramientas necesarias para lograrlo, ya que disponemos de los pensamientos y las ideas de miles de millones de mentes notabilísimas y de la inconmensurable energía de la naturaleza —y está claro que esos instrumentos nos ayudarán a realizar con eficacia esa labor—. Y aun contamos con otro elemento más: la capacidad, quizá única entre las criaturas vivas del planeta, de imaginar un futuro y de poner los medios susceptibles para convertirlo en una realidad.

Especies invasoras

Si ya existe el problema de la contaminación ambiental, la alteración del complejo ecológico y de los recursos del suelo viene a sumarse por la invasión de plantas ajenas a una zona en particular, lo que es un peligro para la biodiversidad nativa, además de que acelera el proceso de degradación. El comercio internacional, a través de varias rutas del globo, se considera que es la causa primordial de la invasión, que desde su descubrimiento por medio de estudios ecológicos se ha considerado como algo parecido a una “explosión ecológica”. (38)

En el presente escenario, estimaciones hechas en 21 países sugieren que el número de invasores bióticos se ha elevado 70% desde 1970; más aún, se considera que contribuyen a 25% de la extinción de las plantas del mundo.

Muchos mecanismos de adaptación se han planteado para explicar la invasión: atributos de reproducción muy eficientes (por ejemplo, perfeccionamiento de la polinización y vigorosa producción de semillas), plasticidad fenotípica, interacción con herbívoros, etcétera).

La invasión genera una degradación al cambiar el ciclo de nutrientes y la estructura del hábitat y al aumentar la diversidad microbiológica y química del suelo y agua. Por lo tanto, las especies invasoras actúan como pasajeros y conductores de la degradación en el Antropoceno.

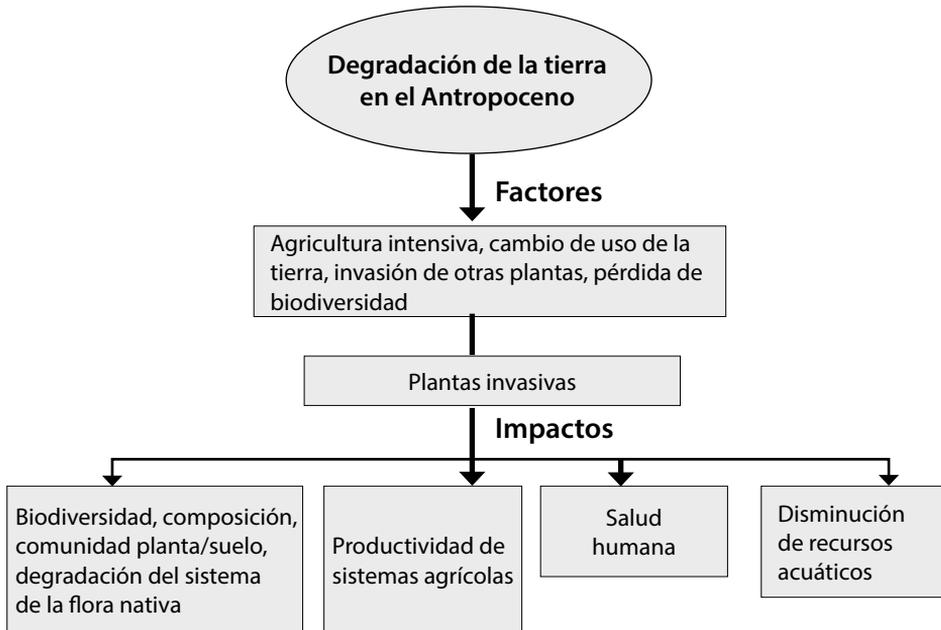
Particularmente, se ha demostrado que las plantas invasoras tienen una alta plasticidad fenotípica y mejores recursos para utilizar los suelos que están ambientalmente perturbados, lo que les da una ventaja sobre las plantas nativas, esencialmente por el cambio climático global. El estatus presente de la perturbación ambiental se puede visualizar por el hecho de que cerca de 33% de la tierra global se ha degradado en su naturaleza por una multitud de efectos deletéreos. (38)

Más aún, se calcula que 52% de las tierras agrícolas se han degradado en cierta medida, lo que impacta a 2 600 millones de personas y agricultores. La restauración de los ambientes degradados puede ser posible con la revitalización de los servicios de los ecosistemas.

Por ejemplo, parece probado el enorme daño que la lombriz de tierra ha causado a los bosques americanos desde su desembarco con los conquistadores europeos. Ha contado para ello con ayuda humana: aunque su avance se limita a 10 metros por año, los pescadores que las adquieren como cebo suelen liberar a aquellas que no han empleado al regresar a casa.

En este caso, el impacto negativo resulta evidente: las lombrices se convierten en el agente dominante de cualquier ecosistema, al condicionar el tipo de plantas que crecerán en él, los insectos que lo habitarán, el hábitat que se ofrece a las especies salvajes y la propia estructura del suelo. La figura 6 muestra los retos ambientales en el Antropoceno, particularmente la relación entre las especies invasoras y algunos de los impactos que causan.

Figura 6. Factores e impactos de la invasión de plantas



El riesgo

El riesgo tiene diferentes significados, dependiendo del contexto; por ejemplo, en una situación de la vida diaria puede ser riesgoso hacer algo, pero ¿cómo definimos el riesgo en un contexto más científico, particularmente cómo definir el riesgo sistemático? En la base diaria, constantemente todo el mundo está haciendo cálculos de riesgo. Esto es cierto. Usted puede pensar: ¿puedo dar la vuelta a la derecha con el coche? ¿Podré hacerlo y evitar que otros coches no me choquen?

Esas preguntas de alguna manera son microcálculos de riesgo; pero no pensamos en ellos de esa manera. Algo un poco más complicado de pensar es la situación en la que nos enfrentamos a una gran intersección en la que hay diferentes cosas a las que debemos poner atención, cosas que son un poco más complicadas que “si puedo dar la vuelta”.

El riesgo complejo, o riesgo sistemático, es muy diferente a los otros dos, simple y complicado, en el sentido de que hay elementos impredecibles en

ese sistema que uno simplemente no puede reducir. El Antropoceno es una era de cambios rápidos del riesgo. A primera vista esto parecería que no es nada nuevo bajo el Sol. Los teóricos de la sociedad de riesgo han descrito su preocupación sobre el futuro como la marca registrada de una “modernidad reflexiva”.

El riesgo es esencial para entender las tecnologías y su potencial de provocar accidentes; el riesgo se ha vuelto sistémico en los escenarios en los que la sociedad moderna opera. ¿Qué añade el Antropoceno a lo anterior? El Antropoceno implica el peligro de alterar el sistema básico funcional de los sistemas terrestres de una manera impredecible. Una manera de ver esto es que va más allá de la estructura familiar de la sociedad de riesgo, precisamente porque la Tierra no puede garantizar la provisión de un espacio seguro para la acción de los seres humanos.

La complejidad y el Antropoceno (39)

Debemos reconocer que la tierra del Antropoceno es todavía más grande que nuestra sociedad moderna, a pesar de que es una fuerza geofísica muy grande. Vivimos en una época de crisis e incertidumbre. Pareciera que la organización de la vida y la representación del futuro, tal como los imaginamos, están siendo desafiados por dinámicas globales que trascienden nuestro entendimiento y nos arrastran hacia situaciones inimaginadas y hasta distópicas; es decir, a una representación imaginaria de una sociedad del futuro cuyas características son indeseables. Se trata, por lo tanto, de lo opuesto a una utopía.

Estadísticamente hablando, la incertidumbre significa que es muy posible no poder calcularla con base en la información disponible. La pregunta es si todavía estamos viviendo en la era de una sociedad de riesgo, o bien debemos describir el Antropoceno como una edad muy compleja de alto grado de incertidumbre.

La complejidad, por su parte, se piensa como una propiedad que define a un sistema como un grupo de cosas interconectadas, de manera que ellas producen su propio patrón de comportamiento en el tiempo. Un sistema complejo tiene múltiples y confusos componentes que se retroalimentan mientras el sistema y los componentes evolucionan.

Contrariamente a lo que sucede con una máquina complicada, un sistema complejo no se puede separar, analizar sus partes y luego volver a ensamblarlas. Las variaciones que experimentan los sistemas de propiedades complejas pueden llegar a situaciones en que no sean predecibles y que muy pequeñas variaciones en las condiciones iniciales provoquen grandes cambios irregulares, no periódicos, en las propiedades, cantidades o valores del sistema. Se dice entonces que se ha llegado al *caos*, teniendo este vocablo una connotación especial en la teoría que estudia la complejidad.

El concepto de Antropoceno ha probado ser una poderosa noción puente en las ciencias naturales, en la medida en que requiere un espectro completo de disciplinas relevantes para entender cómo funciona un sistema de ese tipo y cómo está cambiando. Pero además ha obtenido progresivamente importancia en las ciencias sociales y en las humanidades, ofreciendo una interfase para abordar asuntos globales.

Además, debido a que la llamada ciencia del sistema terrestre trata de considerar a la gente y a la sociedad en tanto insertas en el Sistema Tierra, el Antropoceno ofrece un conector entre las disciplinas.

Requiere la inclusión total del análisis de los aspectos económicos, demográficos, ecológicos, políticos, simbólicos y culturales de las sociedades interconectadas globalmente, tanto como necesita presentar un panorama de interconexión entre la oceanografía, las ciencias atmosféricas, las ciencias de la Tierra, la glaciología y las ciencias paleoambientales.

Riesgo de nuevos conflictos

El ritmo de las alteraciones provocadas hace que las sociedades humanas tengan que afrontar situaciones inéditas. Todas esas dinámicas van a tener repercusiones en los recursos básicos —hídricos y alimentarios, en particular— de los que dependen la subsistencia, la seguridad y la prosperidad de las poblaciones y las naciones del planeta, así como en el orden mundial construido por ellas. Se observa ya el auge del debilitamiento de los Estados y de los problemas de seguridad en varias regiones clave del mundo.

Si los gobiernos no son capaces de atenuar ese efecto, los riesgos de conflictos e inestabilidad van a aumentar y serán más difíciles de controlar. La

península del Cuerno de África es particularmente vulnerable a este respecto, debido a sus carencias estructurales y a los altos riesgos que el cambio climático supone para ella. Por eso es de temer que sea una de las regiones donde hay más probabilidades de que se produzcan conflictos y situaciones de inestabilidad

Con el paso del tiempo y las presiones ejercidas por las condiciones demográficas, económicas y políticas existentes, las repercusiones del cambio climático en los recursos naturales pueden mermar considerablemente la capacidad de un país para autogobernarse y crear conflictos inesperados. A diferencia de otros factores internacionales de riesgo para la seguridad, el cambio climático puede ser modelado con un grado elevado de predictibilidad.

Pero del dicho de predecir al hecho de estar preparado hay un largo trecho. Todas esas dinámicas van a tener repercusiones en los recursos básicos —hídricos y alimentarios, en particular— de los que dependen la subsistencia, la seguridad y la prosperidad de las poblaciones y las naciones del planeta, así como en el orden mundial construido por ellas. Se observa ya el apogeo del debilitamiento de los Estados y de los problemas de seguridad en varias regiones clave del mundo. De esta aptitud se deriva lo que se denomina “legitimidad generada” por el Estado.

Cuando esta legitimidad se halla en peligro, puede contribuir al debilitamiento de las instituciones estatales y al desencadenamiento de conflictos internos e incluso al desmoronamiento del propio Estado. Se observan algunos de los indicios más evidentes de una vinculación entre el cambio climático y la existencia de conflictos entre comunidades de agricultores y pastores, provocados por las condiciones climáticas actuales que agravan las sequías y agudizan la variabilidad de los recursos hídricos.

Una sequía tan extrema y prolongada como la que sufrió Somalia en 2011 a causa del cambio climático puede tensar aún más una situación ya explosiva de por sí por la escasez de recursos básicos. También puede agravar la malnutrición, las epidemias y la inseguridad alimentaria. Las tensiones creadas en un país por la limitación del acceso a los recursos alimentarios e hídricos pueden extenderse inesperadamente a países limítrofes, ya que algunas poblaciones se desplazarán a ellos en búsqueda de los recursos y las condiciones seguridad de que se ven privados.

Esto tiene como consecuencia ejercer una presión suplementaria sobre los recursos de esos países y puede amplificar aún más las tensiones. En casos como éste, el cambio climático no es el causante directo de los conflictos ocasionados por la limitación del acceso a los recursos hídricos, por ejemplo, pero sí multiplica la presión ejercida sobre los recursos naturales y, por lo tanto, aumenta los riesgos de conflictos. Si no mejoran la administración y la gestión de los recursos naturales, las situaciones de este tipo van a proliferar cada vez más en el futuro.

La tasa de retorno energético

Cuando se analiza cualquier máquina o proceso de transformación de un tipo de energía en otro, se tiene que la energía útil más las pérdidas, aplicando el primer principio de la termodinámica, es igual a la cantidad de energía que entra en el proceso procedente de la fuente. Desde el punto de vista del segundo principio de la termodinámica, la energía útil nunca será igual a la energía obtenida de la fuente, ya que siempre se producirá una pérdida de energía por disipación en forma de calor. Esto se conoce como eficiencia el cociente entre energía útil / energía fuente.

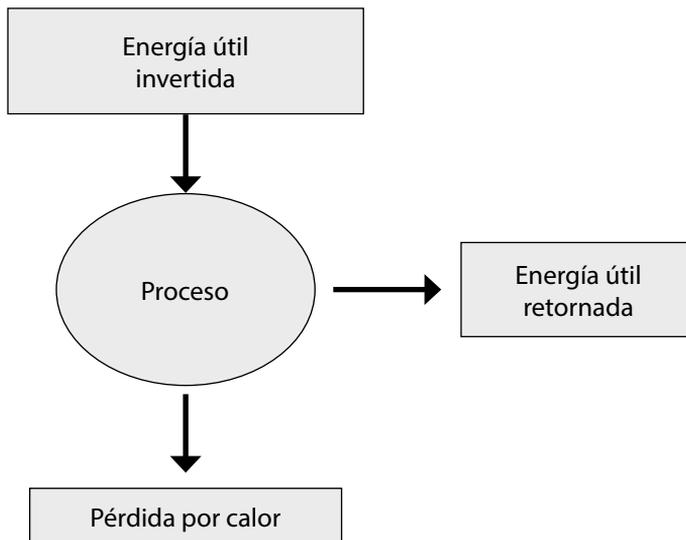
Cuando se dice que la eficiencia de un motor de un coche es de 20%, se quiere indicar que para obtener 20 julios de energía mecánica útil se necesitan 100 julios de energía química de la gasolina. Cuando se habla de generación de energía, en realidad no se está generando nada, lo que se hace es utilizar una máquina o un proceso que transforma determinado tipo de energía (la fuente) —que no resulta útil tal cual está— en otro tipo distinto que sí tiene utilidad. En este proceso se producen pérdidas, y ese proceso será más o menos eficiente en la medida en que se consiga minimizar dichas pérdidas.

Pero para desarrollar y mantener el proceso de transformación energética hace falta invertir energía útil creando su infraestructura, manteniéndola y conservando el proceso. Mientras se ha disfrutado de la disponibilidad de energía barata no ha habido mucha preocupación por el costo energético de poner en marcha y mantener un proceso para obtener energía útil, es decir, con poca entropía y fácilmente manejable.

Si los números (económicos) salían, era suficiente, ya que la energía para su puesta en marcha y mantenimiento no era un factor relevante en esos números. Sin embargo, en la actualidad, cuando ya estamos en el cénit de la producción petrolífera o en sus aledaños, interrogarse sobre cuánta energía útil va a aportar un determinado proceso de transformación de energía, y compararlo con la energía que ha supuesto ponerlo en marcha y mantenerlo, es una de las preguntas más pertinentes que se pueden hacer. La respuesta a esta pregunta es la TRE, o “tasa de retorno energético”.

Esa tasa calcula dividiendo la energía útil que dicho proceso retorna (ER) entre la energía útil (EI) que hemos invertido en desarrollar y mantener ese proceso de transformación de energía: $TRE = ER / EI$ (véase el cuadro 5). Si poner en marcha y mantener un determinado proceso de obtención de energía a lo largo de su vida útil supone utilizar 2 gigajulios, y durante todo ese tiempo he obtenido 40 gigajulios, la TRE es de 20. Obtengo 20 veces la energía invertida en el proceso; por lo tanto es un proceso rentable energéticamente.

Cuadro 5. Concepto de tasa de retorno energético



Sin embargo, un proceso con una TRE igual o menor a 1 no es rentable energéticamente; se trataría más bien de un sumidero de energía. Cuando

se trata de evaluar procesos de obtención de energía útil, la TRE debe ser lo más alta posible.

Es relativamente fácil determinar la energía útil en mantener el funcionamiento del proceso; también puede serlo llevar la contabilidad de la energía invertida en mantener la infraestructura del proceso; pero ¿cómo evaluar la energía invertida en la creación del propio proceso? ¿Debe incluirse la construcción de la fábrica? ¿La fabricación del cemento? ¿La de la maquinaria? ¿La minería del metal con que se fabricó la maquinaria? ¿La energía empleada en los ecosistemas que estuvieron involucrados? Es un problema difícil y además no hay un criterio consensuado sobre cómo resolverlo.

En principio, será más fiable un cálculo de la TRE cuanto más se haya especificado cómo se ha realizado y cuantos más elementos se consideren en ese balance. Por otra parte, en el balance también se debe considerar la energía aportada por los subproductos.

Ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) se utiliza para responder a preguntas específicas como las siguientes: ¿Qué diferencia existe entre dos procesos distintos de fabricación de un mismo producto, en términos de utilización de recursos y emisiones? ¿Cuáles son las contribuciones relativas de las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto a las emisiones totales?

¿Cuál es el impacto socioeconómico? El ACV puede definirse como una metodología para determinar los efectos en materia ambiental asociados a un producto o servicio: compilando un inventario de entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando sus potenciales impactos ambientales, e interpretando los resultados del análisis de cada ACV es posible comparar dos o más productos o servicios diferentes, siempre y cuando tengan la misma función; también facilita la identificación de áreas de mejora en el proceso de producción.

Es decir que se trata de un proceso para evaluar las descargas ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los materiales, la energía utilizada y los residuos liberados al ambiente, para evaluar el impacto del uso de los materiales, la energía y las

descargas al ambiente, y para identificar y evaluar oportunidades para efectuar mejoras ambientales.

Una característica fundamental del ACV frente a otras metodologías de evaluación ambiental es el análisis de sistemas (por ejemplo, un proceso para la obtención de un producto en particular) en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción y el procesamiento de las materias primas hasta la disposición de los productos, considerando sus efectos; sobre todo el medio ambiente circundante (por ejemplo, sobre el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, etcétera).

El ACV está definido por las fronteras del sistema en estudio y consiste en llevar la contabilidad de los impactos ambientales más significativos (gases de efecto invernadero, acidificación, eutrofización, etc.) asociados a los materiales y, la energía consumida y generada dentro de los límites de ese sistema para obtener el producto deseado. A través de la identificación de la función del sistema en estudio se establece la unidad funcional, la cual es una magnitud física que describe una propiedad del producto, cantidad (1L, 1 kg), energía contenida (1 kJ), servicio que presta (1 km), etc., con el fin de cuantificar, en relación con esta unidad, las corrientes de materia y energía que entran y salen de los límites del sistema.

Economía circular

La llamada economía “lineal” es un modelo principalmente explotado durante la segunda Revolución industrial de 1870 con la introducción del petróleo, la electricidad y los productos químicos. Este modelo de consumo consiste en el uso de los recursos con el fin de obtener productos que se pueden usar fácilmente y descartarlos al final de su ciclo de vida.

No existe un “*Plan B*” para ellos y no hay un proyecto para emplear los desechos obtenidos que, en el mejor de los casos, se incineran y producen emisiones de dióxido de carbono. Debido a la baja sustentabilidad de ese modelo y al incremento de la contaminación que afecta al planeta, durante el siglo pasado la idea de un modelo de economía circular se hizo muy llamativa. El modelo está inspirado en los ciclos naturales biológicos en los que los desechos se convierten en nuevos productos en un círculo teórico ilimitado.

Kenneth E. Boulding, conocido economista (1910-1993), fue el primero en llamar la atención sobre la urgencia de transformar el sistema económico lineal a un modelo circular. La economía del futuro se concibe como la tierra representada por una nave espacial, con reservas ilimitadas de todo, ya sea para extraerlo o para contaminar, en la que el hombre debe encontrar su lugar en el sistema cíclico ecológico que es capaz de garantizar la reproducción continua de los materiales, aunque no puede escapar al hecho de requerir impulsos de energía. (40)

Reconociendo que el Antropoceno es una nueva época geológica, es necesario hacer preguntas urgentes acerca de cómo construir una economía más sustentable y resiliente. Este estado de asuntos planetarios orilla a la adopción sistémica de mejores prácticas ambientales y sociales, y la discusión en torno de la economía circular surge como una fuente primaria para mejorar el estado de los asuntos del planeta.

Entre muchas corrientes se han ideado diferentes definiciones que conceptualicen lo que es la *economía circular*. Por ejemplo:

un sistema económico que representa un cambio de paradigma en la manera en que la sociedad humana está con la naturaleza y desea prevenir el declive de los recursos, minimizar el uso de la energía y los materiales y facilitar el desarrollo sostenible a través de la implementación a nivel micro (empresas y consumidores), meso (agentes económicos integrados en simbiosis) y macro (ciudades, regiones y gobiernos).

La economía circular puede ayudar no sólo a disminuir la pérdida de la biodiversidad, sino también, en el mejor de los casos, a ayudar a revertirla. La economía circular busca reducir el nivel de consumo de los recursos y sus correspondientes desechos al obtener un mayor valor de los recursos que se emplean y mantener ese valor en la economía el mayor tiempo posible. Sin embargo, como un sistema necesario, hoy en día no recibe la atención que merece.

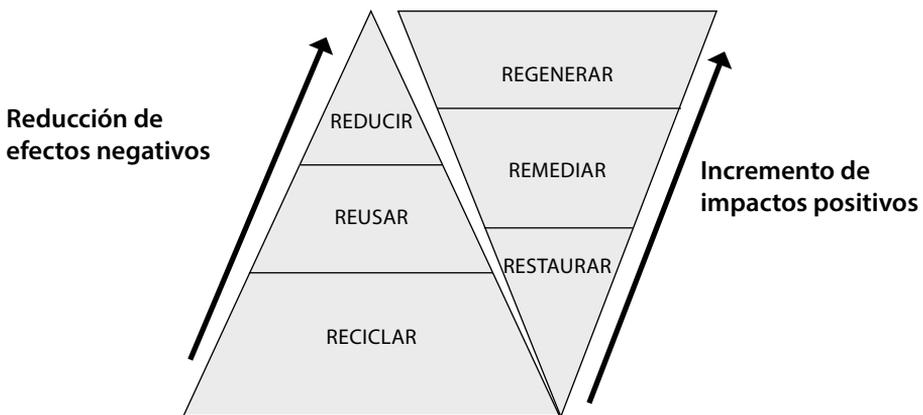
Las dimensiones de regeneración y restauración no han sido incluidas en las conocidas 3R: reducir, reusar, reciclar. Las 3R se enfocan en la reducción de los impactos negativos de las actividades humanas “cerrando la llave” a la contaminación de la basura y los recursos, mientras que un se-

gundo grupo de 3R —remediación, restauración y regeneración— desvía el foco a los impactos positivos de combatir los ecosistemas mundiales en vías de degradación (cuadro 6).

Desde productos diminutos y de corta duración, como paquetes de papas fritas, hasta estructuras aparentemente permanentes, como edificios y carreteras, la economía está llena de cosas que se han diseñado sin preguntar: ¿qué sucederá con esto al final de su vida? La forma más efectiva de retener el valor de los productos es mantenerlos y reutilizarlos.

Considere un teléfono, por ejemplo: es mucho más valioso como tal que como un montón de componentes y materiales. Por eso, los primeros pasos del ciclo técnico se centran en mantener los productos completos para conservar su máximo valor posible. Esto podría incluir modelos comerciales basados en el hecho de compartir, de modo que los usuarios obtengan acceso a un producto en lugar de poseerlo y que más personas puedan usarlo con el tiempo. Lo anterior podría implicar la reutilización a través de la reventa.

Cuadro 6. *Concepto de la economía circular*



Podría significar ciclos de mantenimiento, reparación y renovación. Eventualmente, cuando el producto ya no se pueda usar, sus componentes podrían ser refabricados. Las piezas que no se puedan volver a fabricar se pueden descomponer en sus materiales constituyentes y reciclarse.

Si bien el reciclaje es la opción de último recurso porque significa que se pierde el valor incrustado en los productos y en los componentes, es

de vital importancia como paso final que permite que los materiales permanezcan en la economía y no terminen como residuos. Los materiales biodegradables que no se pueden reutilizar, como algunos subproductos alimentarios, pueden volver a circular en la economía en el ciclo biológico.

Mediante el compostaje o la digestión anaeróbica de materiales orgánicos, se pueden usar nutrientes valiosos, como nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes, para ayudar a regenerar la tierra, de manera que podamos cultivar más alimentos o materiales renovables como el algodón y la madera. Algunos productos, como la ropa de algodón o los muebles de madera, pueden circular tanto por el ciclo técnico como por el ciclo biológico. Se pueden mantener, reutilizar, reparar y, a veces, incluso, reciclar, pero finalmente se pueden devolver al ciclo biológico del que proceden.

Compostados o digeridos anaeróbicamente, pueden alimentar el suelo para cultivar algodón o madera nuevos. Al cambiar nuestra economía de lineal a circular cambiamos el enfoque de extracción a regeneración. En lugar de degradar continuamente la naturaleza, construimos capital natural.

Empleamos prácticas agrícolas que permiten que la naturaleza reconstruya los suelos, lo que aumenta la biodiversidad y devuelve materiales biológicos a la tierra. Actualmente, la mayoría de estos materiales se pierden después de su uso y la tierra utilizada para cultivarlos se queda sin nutrientes. Si pasamos a un modelo regenerativo, comenzamos a emular los sistemas naturales. No hay desperdicio en la naturaleza.

Cuando una hoja cae de un árbol, alimenta el bosque, por lo que, durante miles de millones de años, los sistemas naturales se han regenerado. Los residuos son un invento humano. El lugar obvio para comenzar cuando se cambia a una economía que regenera la naturaleza es la industria alimentaria. La forma en que producimos alimentos hoy en día es un factor importante tanto del cambio climático como de la pérdida de biodiversidad. Depende de cantidades cada vez mayores de fertilizantes sintéticos, pesticidas, combustibles fósiles, agua dulce y otros recursos finitos.

Éstos son una fuente de contaminación y de daño a los ecosistemas y a la salud humana. Al producir nuestros alimentos de forma regenerativa, la atención se centra en mejorar la salud del suelo. Las prácticas agrícolas regenerativas pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de alimentos al reducir la dependencia

de insumos sintéticos y al construir suelos saludables que absorben carbono en lugar de liberarlo.

Además de ayudar a restaurar el ciclo natural del carbono, los suelos sanos pueden retener y absorber mejor el agua, lo que reduce el impacto de las sequías y el riesgo de inundaciones.

Capítulo II

El advenimiento de las carreteras

La historia del transporte carretero inició con la introducción de la rueda y sus subsecuentes aplicaciones para el traslado de bienes. La rueda parece que fue desarrollada en Mesopotamia cerca del año 5000 antes de nuestra era, tal vez concebida originalmente para hacer cerámica. Las primeras carretas de dos ruedas aparentemente se desarrollaron en Mesopotamia y en el norte de Irán por el año 3000 antes de nuestra era y obviamente exigieron mejores carreteras.

Los mineros de cobre de la Europa Central, en la misma época, utilizaron la rueda para transportar el cobre del interior de la mina hacia una localidad más conveniente para trabajarlo. Todas y cada una de las sociedades han tenido la necesidad de trasladar objetos y mercancías.

Así, la necesidad de cargar objetos y distribuirlos en distintos territorios se sitúa en el origen del transporte terrestre, pero también del transporte marítimo y aéreo. Ya en la época precolombina, los incas poseían un sistema de caminos interconectados a través de todo su imperio para trasladar diferentes tipos de mercancías.

En los inicios, el transporte terrestre se realizaba a pie, utilizando la fuerza de los animales o por medio de canoas o botes, aprovechando la corriente de los ríos para hacer llegar sus mercaderías al destino deseado. El hambre fue la causa de que el hombre comenzara a moverse para asegurar su comida y así se inició la forma de transporte tal como la conocemos hoy. Dado que el ser humano es débil como fuerza de transporte, necesitó, al principio, domesticar a los animales.

Las primeras pistas mejoradas de carreteras fueron hechas en ensenadas, pasos de montaña y tierras húmedas. La mejora sustancial debe haber consistido en quitar árboles y grandes rocas del camino. Conforme el comercio se incrementó, los caminos fueron aplanados y ampliados para acomodar el tráfico humano y de animales, permitiendo la comunicación, el comercio y la gobernanza en amplias áreas.

En el año 5000 antes de nuestra era se empezaron a emplear trineos que eran fáciles de propulsar sobre superficies planas. Calles pavimentadas se han encontrado en los primeros asentamientos del año 4000 antes de nuestra era en ciudades de la Civilización del Valle Indus, en el subcontinente de la India, como Harappa. Generalmente los materiales naturales no son lo suficientemente ligeros para crear superficies planas y no son lo suficientemente fuertes para soportar vehículos de ruedas, en especial si la superficie está mojada.

Por lo anterior, las primeras carreteras pavimentadas en piedras se construyeron en Ur en el año 4000 antes de nuestra era. La mejoría en la metalurgia, en el año 2000 antes de nuestra era, produjo utensilios para cortar la piedra en el Oriente Medio y en Grecia, permitiendo la pavimentación de las avenidas. La *Via Apia*, de unos 560 km de largo, fue una de las primeras carreteras romanas construidas en Europa (en el año 312 antes de nuestra era) por el emperador Appius Claudius Caecus y unía a Roma con el puerto de Brindisi.

Conforme el imperio creció, el sistema se expandió para abarcar 80 000 km, en el pináculo del imperio, que unía a Roma con todas las provincias conquistadas. De ahí la frase: “Todos los caminos conducen a Roma”. Por su parte, la Ruta de la Seda es considerada la vía de comercio que más ha perdurado en la historia, ya que se mantuvo en uso por 1500 años, empleada por las caravanas a través de toda el Asia Central con una extensión de 6 400 km de longitud.

A partir del siglo IX surgen las rutas marítimas de los comerciantes árabes, con lo cual decae la Ruta de la Seda ya que era posible transportar grandes cantidades de productos. La ruta marítima iniciaba en Guangzhou y llegaba a Alejandría. La creación de los Estados-nación modernos en el siglo XVII permitió que se estableciera un sistema de transporte formal; un siglo después Francia construyó el sistema real de caminos que abarcaba

24 000 km, con un transporte público a base de diligencias que trasladaban pasajeros y llevaban el correo

Una mirada actual

No cabe duda de que el ser humano es un animal problemático: ninguna otra especie en el curso de la historia natural ha ejercido un dominio tan férreo sobre las demás. Todo ello cabe en el concepto de Antropoceno, cuya razón de ser radica justamente en poner de manifiesto las consecuencias de una acción humana desbordante. Sin embargo, limitarse a describir el estado contemporáneo de las relaciones sionaturales —o los resultados del Antropoceno— no basta. Para someterlo a evaluación moral y acción política resulta preciso no sólo saber qué ha pasado, sino también averiguar por qué ha pasado. Sólo de esta manera podremos diseñar políticas adecuadas para la adaptación social a la nueva época geológica.

O sea, ¿por qué hemos llegado hasta aquí? ¿Cómo explicar el impacto antropogénico sobre el medio natural? ¿Se trata de una contingencia histórica, una elección, algo que podría haber sido muy diferente? ¿O estamos más bien ante una necesidad humana universal, un destino al que no podemos escapar debido al propio modo de ser de la especie? Una mirada lúcida sobre la actualidad muestra que estamos inmersos en profundas transformaciones y asistiendo a un auténtico cambio de ciclo histórico.

Los mejores análisis disponibles señalan que los nuevos desafíos nos impelen a transformar nuestras visiones y formas de abordar el presente y el futuro. Vivir más allá de los límites biofísicos. Si bien los vectores de cambio son muy diversos y se entrecruzan, lo cierto es que existen argumentos suficientes para afirmar que las transformaciones que afrontamos tienen una dimensión crítica y, más allá de otras consideraciones, un carácter diferente al de otros cambios históricos por una cuestión clave: el desbordamiento de los límites ecológicos y de los sistemas de vida a nivel planetario.

Dicho desbordamiento, inducido por la Gran Aceleración, se refleja en múltiples campos y se hace especialmente patente en el crecimiento exponencial de los impactos inducidos por el desarrollo humano y el progresivo

retroceso de los ciclos y los ecosistemas clave que soportan la vida, tal como la conocemos.

Entre la gran cantidad de investigaciones realizadas sobre la extralimitación ecológica destaca, por su consideración científica, el informe *Planetary Boundaries*, elaborado en 2009 por la Universidad de Estocolmo, junto a otros investigadores. (41) Dicho informe identifica una serie de límites planetarios en torno de nueve ciclos biogeofísicos cuyo desbordamiento podría provocar graves alteraciones al sistema terrestre. A continuación, explicamos brevemente esos ciclos (cuadro 7).

Cuadro 7. *Los límites planetarios de los ciclos biogeofísicos*

Integridad de la biosfera
Cambio climático
Nuevas entidades
Disminución del ozono estratosférico
Aerosoles en la atmósfera
Acidificación del océano
Flujos biogeoquímicos
Cambio en el agua fresca
Cambio en el sistema terrestre

1. Integridad de la biosfera

Hay una miríada de interacciones con la geosfera que hacen a la biosfera un componente esencial del sistema terrestre y un factor mayor en la regulación de su estado. El funcionamiento de la biosfera descansa en la diversidad genética heredada de la selección natural no sólo durante la historia dinámica de la coevolución con la geosfera, sino también en su papel regulador del estado del sistema terrestre.

Si bien es cierto que los problemas de calentamiento climático se hicieron evidentes en los años ochenta del siglo pasado, los problemas que surgieron en la integridad funcional de la biosfera debido al uso de la tierra iniciaron un siglo antes. En ese sentido, el término “integridad” no implica solamente el cambio en la biosfera, sino más bien el cambio que preserva toda la dinámica y el carácter adaptativo de la biosfera que se encuentra en riesgo creciente.

2. Cambio climático

Los más importantes impulsores del impacto antropogénico en el balance del sistema energético del planeta son, sin duda, la emisión de gases de efecto invernadero, los aerosoles y los cambios en el albedo superficial.

3. Nuevas entidades

La definición de este límite se restringe a la introducción de nuevos elementos antropogénicos en el sistema terrestre. Éstos incluyen químicos, sustancias sintéticas (por ejemplo, microplásticos, disruptores endócrinos y contaminantes orgánicos), movilización antropogénica de materiales radioactivos, organismos modificados genéticamente y otras intervenciones de los seres humanos en el proceso de la evolución. Todos ellos sirven como marcadores del Antropoceno, aunque en su impacto como conjunto no están bien definidos.

4. Disminución del ozono estratosférico

Esta disminución constituye un caso especial relacionado con la liberación antropogénica de nuevos químicos, entre los que se cuentan los compuestos gaseosos de halocarbonos provenientes de la industria. Aparentemente, este límite que ha perturbado al ozono estratosférico ha disminuido, pero transgredido en el Antártico.

5. Aerosoles en la atmósfera

La incorporación de aerosoles tiene múltiples consecuencias físicas, biogeoquímicas y biológicas en el sistema terrestre. El aerosol antropogénico se ha incrementado y los cambios de los aerosoles naturales (polvo del desierto, hollín de los incendios forestales) desde la era preindustrial es difícil de modelar, pero la evidencia observada sugiere que el depósito de polvo se ha

duplicado desde 1750. En el presente, el Sahara es la región que provoca la mayor cantidad de polvo, sin olvidar que a principios del Holoceno éstos eran terrenos cultivables con numerosos lagos. Sin embargo, se cree que este límite no representa un peligro inminente.

6. Acidificación del océano

En este momento la acidificación antropogénica del océano yace en el margen de un espacio seguro; sin embargo, esto se verá degradado por la emisión continua de dióxido de carbono que aumenta la concentración del ion carbonato en la superficie, que se estima oscila en 81% respecto de los niveles preindustriales.

7. Flujos biogeoquímicos

Estos flujos reflejan la perturbación antropogénica de los ciclos elementales del planeta. Se considera que el nitrógeno y el fósforo son los dos elementos que constituyen los bloques fundamentales de la vida y que dichos ciclos han sido notablemente alterados por la agricultura y la industria. El impacto antropogénico del ciclo del carbono ha sido alterado, pero se relaciona con el clima y la integridad de la biosfera.

8. Cambio en el agua dulce

Se asume que las diversas transgresiones que se han dado (capacidad reducida del secuestro de carbono, regulación del clima y pérdida de biodiversidad) han sido producidas a partir del Holoceno. El componente de la llamada agua azul (superficial y subterránea) y del agua verde (agua disponible para las plantas) se estima a partir de la desviación en el flujo de la corriente de agua verde que, de acuerdo con mediciones satelitales, se han reducido 18% para el agua azul y 16% para la verde.

9. Cambio en el sistema terrestre

Los límites se enfocan en tres bosques mayores de contenido biomásico que juegan un papel muy relevante en los procesos de la biogeofísica: tropical, templado y boreal. Sobre la base del año 2019, los mapas de cobertura de la tierra derivados de observaciones satelitales muestran valores semejantes a los de 2015 aunque en la mayoría de las regiones la cantidad de deforestación se ha incrementado.

La conversión del uso de la tierra y los incendios han causado un rápido cambio en las áreas forestales y la deforestación del Amazonas trasgrede los límites planetarios.

El auge perverso del metabolismo urbano-agroindustrial se aceleró aún más en la segunda mitad del siglo xx, en especial en las dos últimas décadas, tras las crisis energéticas de la década de 1970, cuando el capitalismo alcanzó una dimensión y una profundidad verdaderamente globales. A esto no fue ajena la utilización masiva del petróleo.

Sólo el uso de los combustibles derivados del petróleo permite comprender cómo el comercio mundial pudo multiplicarse por 50 en la segunda mitad del siglo xx, dos veces más que la producción industrial. La explosión de la movilidad motorizada que lo hizo factible se debió a que el consumo de petróleo se multiplicó por ocho en los últimos 50 años del siglo y a que además su consumo se fue dedicando crecientemente a garantizar esa movilidad.

Conforme comienza el nuevo siglo, el mundo enfrenta un grupo de riesgos que en algunos casos son nuevos y en otros ya familiares. Hemos regresado a los “viejos riesgos”: inflación, crisis del costo de vida, confrontación y espectro de guerras nucleares, desencanto social, etcétera.

Los riesgos anteriores se han visto amplificados por nuevos desarrollos de riesgos globales, como niveles de endeudamiento exorbitantes, declive del desarrollo humano después de décadas de progreso, desarrollo rápido sin capacidad de detener el uso de tecnologías de uso civil y militar, y presión creciente de los impactos del cambio climático y las ambiciones cada vez más restringidas de no rebasar 1.5 °C la temperatura global del planeta.

El Reporte Global de Riesgos presentado por el Foro Económico Mundial a principios de este siglo muestra los resultados de la percepción que

existe en el corto y largo plazos sobre los problemas que aquejan a la humanidad. La severidad relativa de los riesgos en periodos de 2 y 10, incluyen los siguientes:

- *Ecosistemas naturales*: el riesgo de deterioro del capital natural y sus servicios (agua, bosques, organismos vivos) debido a los mecanismos de crecimiento y retroalimentación relacionados con el cambio climático nos llevan a un punto de no retorno.
- *Salud humana*: los riesgos crónicos que se han generado por un sistema de salud empobrecido que tiene repercusiones sociales, económicas y de salud.
- *Seguridad humana*: contrario a la desmilitarización hay una creciente vulnerabilidad de estados armados con nuevos pertrechos que provocan conflictos multidomínios.
- *Derechos digitales*: la evolución potencial de la inseguridad de los datos provee una insidiosa erosión de la autonomía digital de los individuos, poniendo en peligro su privacidad.
- *Estabilidad económica*: la creciente crisis de la deuda con repercusiones de contagio financiero, así como el colapso de los servicios sociales, provoca una calamidad social.

Percepción de los problemas de la humanidad

El colapso del ecosistema se visualiza como uno de los efectos de deterioro más rápidos que enfrenta la próxima década. La era de la nueva economía puede generar una mayor divergencia entre los países ricos y pobres y por ello un retroceso en el desarrollo que se había dado en décadas. La política económica será empleada defensivamente para crear una producción auto-suficiente e imponer una soberanía sobre los poderes rivales, pero también será empleada para impedir ofensivamente el desarrollo de otros países.

La tecnología exacerbará las desigualdades donde el riesgo de la ciberseguridad permanecerá como una preocupación constante. Estimulada por los gobiernos y los gastos militares, así como por la inversión privada, la investigación y el desarrollo en tecnologías emergentes continuará amplián-

dose en la próxima década y tendrá como resultados avances en inteligencia artificial, computación cuántica y biotecnología, entre otras.

Para los países que puedan desarrollarlas, estas tecnologías proveerán soluciones parciales a un amplio rango de crisis emergentes en salud, seguridad alimentaria y mitigación climática, pero aquellos que no pueden solventar esas tecnologías padecerán desigualdades y divergencias crecientes. El análisis complejo de gran cantidad de datos permitirá el mal uso de la información personal a través de mecanismos legítimamente legales, debilitando la soberanía individual y el derecho a la privacidad.

La mitigación del clima y los esfuerzos de adaptación se encuentran en peligro, siendo los colapsos naturales y los riesgos climáticos y medioambientales los temas de mayor preocupación para la próxima década. La falta de un profundo y concertado progreso de los problemas climáticos expone las divergencias entre lo que es científicamente necesario de alcanzarse y lo que es políticamente posible de hacerse.

El costo de los alimentos y los combustibles exagera la vulnerabilidad social al tiempo que disminuye la inversión en el desarrollo humano y erosiona la resiliencia futura. El cuadro 8 muestra la percepción de la gente, a corto y largo plazos, en torno de los problemas que enfrenta la humanidad.

Cuadro 8. *Percepción a corto y largo plazos de los problemas que enfrenta la humanidad*

<i>Corto plazo</i>	<i>Largo plazo</i>
Crisis del costo de vida	Imposibilidad de mitigar el cambio climático
Desastres naturales y eventos climáticos	Imposibilidad de adaptarse al cambio climático
Confrontación geoeconómica	Desastres naturales y eventos climáticos extremos
Incapacidad de mitigar el cambio climático	Pérdida de biodiversidad y colapso del ecosistema
Erosión de la cohesión social y polarización	Migración involuntaria a gran escala
Incidentes de grandes daños ambientales	Crisis de recursos naturales
Imposibilidad de adaptarse al cambio climático	Erosión de la cohesión social y polarización
Aumento de la inseguridad cibernética	Aumento de la inseguridad cibernética
Crisis de recursos naturales	Confrontación geoeconómica
Migración involuntaria a gran escala	Incidentes de grandes daños ambientales

Rivalidades emergentes por los recursos

En el futuro, aunque exista una coordinación internacional, no se puede resolver el problema triple de alimentos, agua y energía para las naciones más vulnerables con una preocupación creciente por su incapacidad para adquirir bienes, aunado a la falta de estabilidad económica y política. Buena parte de la confrontación geopolítica se enfoca en la concentración geográfica de la mayoría de los metales y los minerales.

Los metales y los minerales fundamentales son motivo de una confrontación geopolítica debido a su concentración geográfica. Entre los materiales esenciales para la obtención de energía se cuentan antimonio, cromo, indio, manganeso, molibdeno, níquel, plata y litio. Por ejemplo, la demanda de níquel para 2040 será 200% mayor que la de 2020, debido a su aplicación en baterías para vehículos eléctricos.

La extracción de litio puede llegar a sus límites materiales en la segunda mitad de este siglo, lo que en parte se puede paliar colectándolo y reciclándolo al 100%. El neodimio y el disprosio se emplean primordialmente para los magnetos de motores y generadores de vehículos. El indio es parte de las pantallas táctiles, así como de los paneles solares, mientras que el cobalto tiene múltiples aplicaciones espaciales, pero también interesa como catalizador para la producción de hidrógeno. Finalmente, el vanadio se emplea como componente de las baterías y los vehículos espaciales, así como de aviones de carga.

La transición energética

La transición energética se define como el conjunto de cambios en los modelos de producción, distribución y consumo de energía para alcanzar una mayor sostenibilidad. El objetivo de este proceso es transformar el sistema energético actual, cimentado en los combustibles fósiles, en un modelo eléctrico basado en energías renovables y en otras formas de reducción de emisiones. El proceso de transición energética no es novedoso.

Otros cambios importantes han precedido al actual a lo largo de la historia, como el paso de la madera al carbón como medio de producción de energía en el siglo XIX, y del carbón al petróleo en el siglo XX. Sin embargo, lo que caracteriza a esta transición respecto de las anteriores es la necesidad de proteger a la Tierra de la peor amenaza que hemos experimentado hasta el momento: el cambio climático. Una defensa para la que debemos prepararnos lo más rápido posible. Una transformación necesaria de la que todos debemos ser partícipes y protagonistas.

La historia reciente de la humanidad ha vivido múltiples transiciones energéticas apenas en 200 años. El avance de la ciencia y la industria ha modificado drásticamente nuestra forma de vida y la manera en que utilizamos la energía. Hasta principios del siglo XIX la humanidad utilizaba fuerzas naturales como el viento o el agua para conseguir la energía necesaria para el día a día de la época. Los cambios del paradigma energético fueron impulsados por inventos revolucionarios como la máquina de vapor o los motores de combustión interna.

La utilidad proporcionada por estos inventos y su uso a gran escala fueron el motor de cambio de una economía global principalmente agraria, a una industrial, y el motivo de las transiciones energéticas, ya que se necesitaron nuevas fuentes de energía para proporcionar insumos energéticos más eficientes.

Primera transición energética: el carbón

Antes de la Revolución industrial se utilizaban fuentes naturales para las tareas más habituales del día a día: se quemaba madera y se usaba estiércol para calentar los hogares y cocinar, se dependía de la fuerza muscular, el viento y los molinos de agua para moler los granos, y para el transporte se utilizaban elementos básicos como la rueda y la fuerza animal. Durante los siglos XVI y XVII, a medida que la sociedad crecía y se hacía más compleja, el aumento de consumo de leña y carbón en los hogares y en la industria provocó escasez y el aumento de los precios de estos insumos.

En consecuencia, las economías en vías de industrialización, como el Reino Unido, necesitaron una fuente de energía nueva y más barata. Los bri-

tánicos optaron por el carbón, lo que marcó el comienzo de la primera gran transición energética.

El aumento del consumo y la producción del carbón provocó la caída de sus costos gracias a las economías de escala. Los avances tecnológicos de la época y sus adaptaciones conllevaron nuevas formas de utilización del carbón.

El crecimiento de la participación del carbón en la combinación energética mundial fue evidente: en 100 años pasó de 1.7 a 47.2%. A nivel doméstico, el carbón era usado para calentar hogares y cocinar alimentos. A nivel industrial, elementos como el ferrocarril o la máquina de vapor implicaron la multiplicación de su consumo.

Segunda transición energética: el petróleo y el gas

En 1859, Edwin L. Drake instaló el primer pozo de petróleo comercial en Pensilvania, pero fue casi un siglo después cuando ese insumo se convirtió en una importante fuente de energía.

Antes de la producción en masa de automóviles, el petróleo se usaba principalmente para fabricar lámparas. Este aceite mineral, a nivel mundial, comenzó a entrar en juego como recurso energético hacia finales del siglo XIX, época en que era utilizado para la iluminación en la forma de queroseno, razón por la cual también se llamaba petróleo de quemar.

El bajo precio del petróleo, como consecuencia de la gran cantidad disponible, estimuló el consumo de queroseno en el alumbrado, en las cocinas y en la calefacción, sustituyendo al carbón en los hogares. Sin embargo, la auténtica revolución del petróleo se dio con la industria del automóvil.

El invento del motor de combustión interna comenzó a aumentar después de la introducción de las líneas de montaje y a partir de 1945 se disparó. Paulatinamente, el petróleo se fue utilizando para toda clase de usos, en fábricas de todo el mundo e incluso para producir electricidad. Tuvo un impacto fundamental la introducción del propano y el butano, que abrió nuevas oportunidades para usar gas en las casas particulares.

A medida que se instalaron las tuberías, el gas se convirtió en una fuente importante de energía para la calefacción, la cocina, los calentadores de agua

y otros electrodomésticos que pronto abastecieron a millones de hogares. Durante la segunda mitad del siglo xx también es destacable la producción de energía nuclear.

La primera central de este tipo se inauguró en 1954 en la Unión Soviética. A partir de entonces su uso se extendió por el mundo y esas centrales se han convertido en una fuente de producción de electricidad importante en muchos países.

Sin embargo, los elevados costos de instalación y mantenimiento de las centrales que usan el uranio como combustible, unido a los graves accidentes de Three Miles Island en 1979, Chernóbil en 1986 y Fukushima en 2011, han relegado a esta energía a un papel secundario en una gran cantidad de países, que en su momento apostaron por ella.

Por último, también entre finales del siglo xix y finales del siglo xx, hay que mencionar la importancia de la generación de electricidad en centrales hidroeléctricas. A finales del siglo xix, la extensión del alumbrado eléctrico y la revolución de las telecomunicaciones colocaron a la electricidad procedente de las centrales hidroeléctricas como una de las fuentes de energía más importantes a nivel mundial, junto al carbón.

Tercera transición energética: la transición a la energía renovable

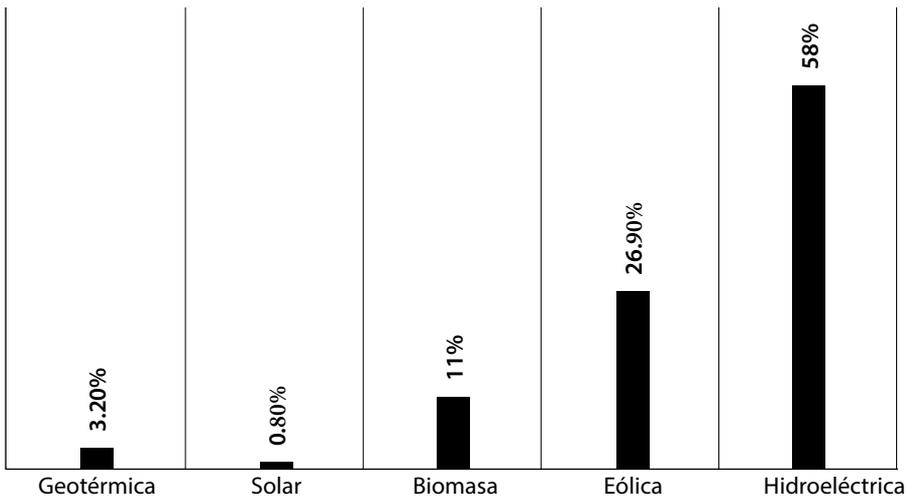
Las fuentes de energía renovable están en el centro de la transición energética que se está produciendo en los últimos 15 años. Las energías renovables, en especial la eólica, la hidráulica y la solar, se han ido incorporando gradualmente al conjunto energético global, experimentando un crecimiento constante.

Los avances en la biotecnología serán fuente de una gama de productos derivados de la transformación de la biomasa. La energía nuclear, particularmente la obtenida de la fisión, puede convertirse también en una fuente importante, aunque hoy en día ésa sólo es una especulación. Otro uso emergente de la energía lo constituye el empleo del hidrógeno, particularmente para potenciar los vehículos y para emplearse en pequeños generadores de energía y sistemas portátiles.

La contribución de las energías renovables incorporadas al sistema terrestre se muestra en la figura 7, y la lista de este tipo de energías, a continuación:

- a) *Energía eólica*: la energía que se obtiene del viento.
- b) *Energía solar*: la energía que se obtiene del sol. Las principales tecnologías son la solar fotovoltaica (aprovecha la luz del sol) y la solar térmica (aprovecha el calor del sol).
- c) *Energía hidráulica o hidroeléctrica*: la energía que se obtiene de los ríos y corrientes de agua dulce.
- d) *Biomasa*: la energía que se extrae de materia orgánica.
- e) *Energía geotérmica*: la energía calorífica contenida en el interior de la Tierra.
- f) *Energía mareomotriz*: la energía que se obtiene de las mareas.

Figura 7. Contribución de las energías renovables incorporadas al sistema terrestre



A. Energía eólica

La energía eólica, que transforma en electricidad la fuerza de un recurso inagotable como el viento, es una apuesta sostenible y de gran valor para el futuro. El aprovechamiento del viento requiere la instalación de parques eólicos, ya sea en tierra o en alta mar, con decenas de aerogeneradores. Estos gigantes se han convertido en parte del paisaje en los últimos años.

Las instalaciones eólicas permiten el empoderamiento del usuario, evitan pérdidas de transporte por la proximidad de la carga, además de reducir la demanda de infraestructura eléctrica externa y evitar emisiones a la atmósfera. Pero aspectos como seguridad, sombras, ruido, vibraciones o impacto visual son sus limitantes. Esta tecnología exige investigación y desarrollo para su implementación en los límites urbanos.

B. Solar fotovoltaica

La primera persona que descubrió cómo aprovechar la energía solar fue William Robert Grove (1811-1896), abogado y científico inglés, precursor y padre de las pilas de combustible.

Grove sumergió dos electrodos de platino —a los que les había adherido un depósito sellado de oxígeno e hidrógeno, respectivamente— en una disolución de ácido sulfúrico, observando cómo se producía una corriente eléctrica continua a la vez que disminuían los niveles de oxígeno e hidrógeno. A su descubrimiento lo denominó “pila de gas”.

Sin embargo, tomó más de 100 años para que dicha tecnología llegase a tener 10% de eficiencia, lo que la hizo más atractiva para su implementación.

Empleando esta tecnología, la primera gran planta solar se inauguró en 1981, empleando 1818 espejos para reflejar la luz y conducirla a un receptor que produce calor, con lo cual funciona un generador. La principal barrera para su integración a gran escala es la intermitencia solar y la necesidad de prever redes eléctricas con flujo bidireccional.

C. Energía hidroeléctrica

Los primeros en utilizar el poder del agua fueron los europeos 200 años antes de nuestra era para moler los granos. Desde esa época, el agua se ha empleado para generar electricidad. La primera planta de este tipo fue construida en 1882. Para ello se hace circular un caudal de agua por un circuito hidráulico que salva el desnivel entre dos puntos, lo que se conoce comúnmente como salto, y en el que el agua va adquiriendo velocidad a medida que la energía potencial se va transformado parcialmente en energía cinética.

La turbina es la encargada de transformar esa energía cinética en energía mecánica, para que el generador la transforme a su vez en energía eléctrica. Por último, el caudal de agua abandona la turbina y desagua de nuevo al río sin apenas velocidad y con la energía potencial que corresponde a la altura del punto de desagüe.

D. Energía de la biomasa

La biomasa incluye todos los materiales orgánicos, naturales y basados en plantas. Agrupada, la producción de la biomasa es ocho veces mayor que todo el consumo global de todas las otras fuentes de energía; se sitúa como la cuarta fuente de energía después del carbón, el petróleo y el gas natural y su demanda alcanzará los 18 millones de toneladas en 2030. La biomasa como forma de energía constituye hasta 35% de la energía primaria consumida en los países desarrollados.

La biomasa se considera una fuente de energía doméstica y su accesibilidad la hace independiente de las variaciones de precios y de la incertidumbre en el suministro que se aplica a los combustibles derivados de fuentes fósiles. La energía basada en la biomasa es única por el hecho de que guarda la energía solar cuando las plantas están creciendo y luego al ser combustionada; en otras palabras, la combustión de la biomasa es el inverso del proceso de la fotosíntesis.

E. Energía geotérmica

La geotermia superficial es utilizada en el calentamiento de agua o en aplicaciones de climatización. Este recurso energético está presente en cualquier geografía, pero sólo se puede aprovechar en localizaciones con condiciones físicas concretas. En las ubicaciones más favorables se manifiesta de forma natural mediante fuentes termales, géiseres o volcanes.

Esta fuente de energía primaria renovable es una pieza clave en la senda hacia la descarbonización, ya que puede cubrir una parte importante de la demanda de climatización y electricidad de nuestros edificios e industrias. Para tener una idea, una planta geotérmica de 10 MW es capaz de producir anualmente la energía que necesitan más de 23 000 viviendas y su uso evitaría la emisión de 57 000 toneladas de CO₂ cada año.

F. Energía mareomotriz

Las corrientes marinas pueden aprovecharse con diferentes tecnologías: mareomotriz, corrientes, maremotérmica, olas o potencia osmótica. La energía mareomotriz tiene mayor grado de madurez y actualmente se explota a escala comercial. Su infraestructura requiere una bahía y un estuario. Es de naturaleza intermitente, aunque es posible predecir su producción. El reservorio se llena con marea alta debido al movimiento gravitatorio. Se aprovecha el movimiento del mar para generar electricidad.

Tendencias de movilidad urbana (42)

Las grandes metrópolis están replanteando las convenciones tradicionales sobre el transporte. ¿Cuál es el papel de los coches en ciudades con una población creciente? ¿Cómo deben recogerse y analizarse los datos sobre el transporte de forma equilibrada? Éstas son sólo algunas de las cuestiones que alimentan la discusión sobre la movilidad en nuestros días, a medida que aparecen nuevas formas y modelos de desplazarse.

A medida que las ciudades de todo el mundo empiezan a retomar su co-

tidianidad después de la pandemia, los sistemas de transporte evalúan nuevas dimensiones para afrontar el futuro. Los cierres por el virus aceleraron cambios que ya se habían contemplado en el pasado, como hacer más accesibles los centros para los peatones y los ciclistas.

La pandemia ha añadido una serie de requisitos nuevos a los que deben enfrentarse las autoridades; por ejemplo, la definición de seguridad se ha ampliado para incluir el componente de higiene. Por eso, a medida que aumenta el flujo de pasajeros en este nuevo panorama, es probable que un viaje seguro signifique, además, que sea higiénico. Para lograrlo, los operadores de transporte tienen que utilizar nuevas medidas, como controles de temperatura, servicios más frecuentes, entre otros.

• *Las ciudades se replantean lo básico*

Los fundamentos de un sistema de transporte siguen siendo básicos: el mantenimiento de la infraestructura y la accesibilidad, la fiabilidad y la aplicación coherente e igualitaria de las normas. Sin embargo, hay un interés renovado por muchas medidas “anticuadas”, como pintar a menudo las líneas de las carreteras para que sean visibles o potenciar el uso de bolardos de plástico con el fin de crear carriles más seguros para los ciclistas. Por el contrario, muchas tecnologías de movilidad, que parecían prometedoras, no se han adaptado tan rápidamente como se pensaba.

• *Las ciudades se replantean los coches*

La relación de las ciudades con los automóviles es compleja. A veces es imposible entender la evolución de los entornos urbanos sin reconocer cómo los coches han contribuido a su desarrollo. A pesar del papel de los vehículos en la mayoría de los países, un número cada vez mayor de núcleos urbanos está explorando formas de restringir su uso y de alejar a la gente del transporte privado.

Los accidentes y la contaminación son algunos de los riesgos fundamentales que rodean el uso de los coches y que cada vez son más graves. El im-

pacto negativo de los coches, en términos medioambientales, ha causado que las poblaciones creen normas más estrictas, pero, al mismo tiempo, las metrópolis han tratado de fomentar el uso del transporte público.

• *Tranvías: vuelta al futuro*

Los tranvías circularon por las calles desde finales del siglo XIX hasta mediados del XX. Sin embargo, muchos sistemas se extinguieron porque dieron paso al desarrollo urbano basado en el automóvil. En la actualidad, los tranvías están volviendo a aparecer en ciudades de todo el mundo. Un ejemplo de esto es Europa, que cuenta con más de 210 redes de tranvías, un tercio de las cuales fueron introducidas en la década de 1990.

No a todos le agrada la idea de los tranvías, pero ofrece múltiples ventajas. Los nuevos modelos pueden viajar a mayor velocidad y con carriles segregados, y aunque la construcción de las vías es más cara, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo del tranvía-tren que reutiliza antiguas líneas de ferrocarril.

• *Los nuevos fundamentos: las ciudades se replantean lo digital*

Las soluciones digitales se están convirtiendo en un elemento esencial para pensar en un sistema de transporte eficiente y práctico. Una encuesta realizada a líderes de 100 ciudades de todo el mundo reveló que más de dos tercios de ellos están probando o han instalado semáforos inteligentes o tecnologías de comunicación entre vehículos e infraestructuras. Los sistemas de pago y emisión de billetes sin contacto son cada vez más comunes.

Además de la comodidad que esto representa para los viajeros, el modelo sin contacto proporciona datos valiosos para crear nuevas estrategias de movilidad. Todas las ciudades tienen algún tipo de aplicación para el transporte, aunque su funcionalidad varía y se limita principalmente a la planificación de rutas. La complejidad de las tecnologías permitirá una adaptación de sistemas operativos de movilidad para toda la población.

• **Los nuevos fundamentos:
las ciudades se replantean los datos**

Los flujos de datos entre el sector público y el privado son cada vez más importantes para comprender y gestionar el impacto de nuevos métodos de transporte y servicios digitales. Éstos se han convertido en un requisito fundamental para gestionar la movilidad en las ciudades.

Cada sistema de transporte está arraigado a la cultura del lugar en el que opera y los pasajeros son conservadores y no tienden a cambiar hábitos de viaje. Sin embargo, la movilidad está en un punto de inflexión y las circunstancias actuales ofrecen oportunidades para su replanteamiento.

El consumo energético de los vehículos

La eficiencia de un motor es la meta histórica de la ingeniería automotriz. Charles Kettering fue el pionero en la investigación de motores de combustión interna. Su trabajo revolucionó la industria automotriz al desarrollar la primera batería eléctrica para arranque de automóviles, conocida como “batería Delco”. También fue el inventor del encendido eléctrico y del primer sistema de luces intermitentes para vehículos.

Kettering predecía la desaparición de la máquina de combustión interna a los cinco años siguientes debido al desperdicio de energía del auto. “El buen Dios ha tolerado la tontería de desperdiciar el 90% de la energía del combustible”.

Antes de continuar, es necesario definir los términos *economía de combustible* y *consumo de combustible*, ambos ampliamente usados, pero a menudo empleados incorrectamente.

La economía de combustible es una medida de qué tan lejos puede viajar un coche con un litro de combustible se expresa en kilómetros por litro. Simplemente, la economía de combustible mide la distancia recorrida por unidad de combustible. El consumo de combustible, por su parte, es el inverso de la economía de combustible. Es la cantidad de combustible consumido al conducir una cierta distancia. La eficiencia vehicular generalmente se define por la distancia recorrida al emplear una cierta cantidad de

energía. Con el refinamiento a las medidas de impacto ambiental se emplean ahora los gramos de CO_2 por kilómetro o los kilovatios-hora por kilómetro. (43)

Una vez descritos los fundamentos básicos de la eficiencia de un vehículo, podemos señalar cuál es la energía necesaria para mover un vehículo empleando la mecánica de Newton. Las tres leyes del movimiento tienen un impacto significativo en el movimiento de un vehículo. La primera ley afirma que un objeto en reposo permanece en reposo y un objeto en movimiento permanece en movimiento.

Sin embargo, a esto le falta un elemento importante relacionado con las fuerzas. Podríamos ampliarla al afirmar: un objeto en reposo permanece en reposo y un objeto en movimiento permanece en movimiento a velocidad y dirección constantes a menos que sobre él actúe una fuerza externa y no balanceada.

La segunda ley señala que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta aplicada e inversamente proporcional a su masa. En este caso, si se aplica mayor fuerza al vehículo (como empujar el acelerador), será mayor su aceleración.

Finalmente, la tercera ley sostiene que por cada acción existe una reacción igualmente opuesta. En el caso del auto, esto significa que cuando sus ruedas empujan hacia atrás en el suelo, éste empuja hacia delante, impulsando el auto hacia delante. Ahora podemos deducir la variación en la fuerza del vehículo que lo acelera o lo desacelera:

$$\text{Fuerza} = \text{Masa del vehículo} \times \text{Aceleración}$$

Un valor de la fuerza positiva (la parte izquierda de la ecuación) significa que el vehículo está acelerando, y una negativa que el vehículo desacelera. Si el valor es cero implica que el vehículo está en un estado de equilibrio (no se mueve o se mueve a velocidad constante).

La masa del vehículo tiene influencia en la transformación de la energía dirigida al movimiento vehicular. Conforme más pesados son los vehículos más difícil será acelerarlos/desacelerarlos. De lo anterior se desprende que una manera de incrementar la eficiencia es hacer menos pesado el vehículo, empleando materiales más ligeros.

El motor a gasolina y diésel (44)

El motor eléctrico se ha incorporado, con gran eficiencia, en gran cantidad de procesos de producción que requieren un movimiento rotativo, ya sea como impulsor de ejes tractivos o como generador de energía. Para comprender mejor su relevancia, sobre todo en el transporte, revisemos un poco de historia. El primer vehículo fue de vapor y se le atribuye al ingeniero militar Cugnot, en 1769.

En ejes paralelos de aquella época, James Watt perfeccionó y habilitó el primer motor útil, en el cual también se utilizó vapor (superando el desperdicio energético de las máquinas térmicas existentes) para proporcionar fuerza motriz y generar movimiento rotativo.

Watt pretendía demostrar que su motor podía aplicarse en trabajos pesados que sólo hacían los animales domesticados, como el caballo, ¡y lo logró! Se dice que aquí nace la Revolución industrial. Por su gran contribución, la unidad de potencia eléctrica del Sistema Internacional de Unidades se identifica como “vatio” o “watt”, y la unidad de medida del consumo energético, como kilowatt-hora).

El primer vehículo eléctrico se lo debemos al escocés Robert Anderson, en 1832. Su fuente de energía ya la conformaba un conjunto de acumuladores. Los ingenieros Gaston Plante y Camille Faure mejoraron las baterías, incrementando la autonomía de funcionamiento del vehículo. Este hecho disparó la demanda en Francia, Estados Unidos y Gran Bretaña, principalmente.

A mediados del siglo XIX ya rodaban más de 30 000 autos eléctricos. Por otro lado, sin pretender competir con el motor eléctrico, Robert Street creó, en 1794, uno de combustión interna, que sirvió de base a las ideas, estudios e investigaciones de uno de los padres de la termodinámica, Sadi Carnot.

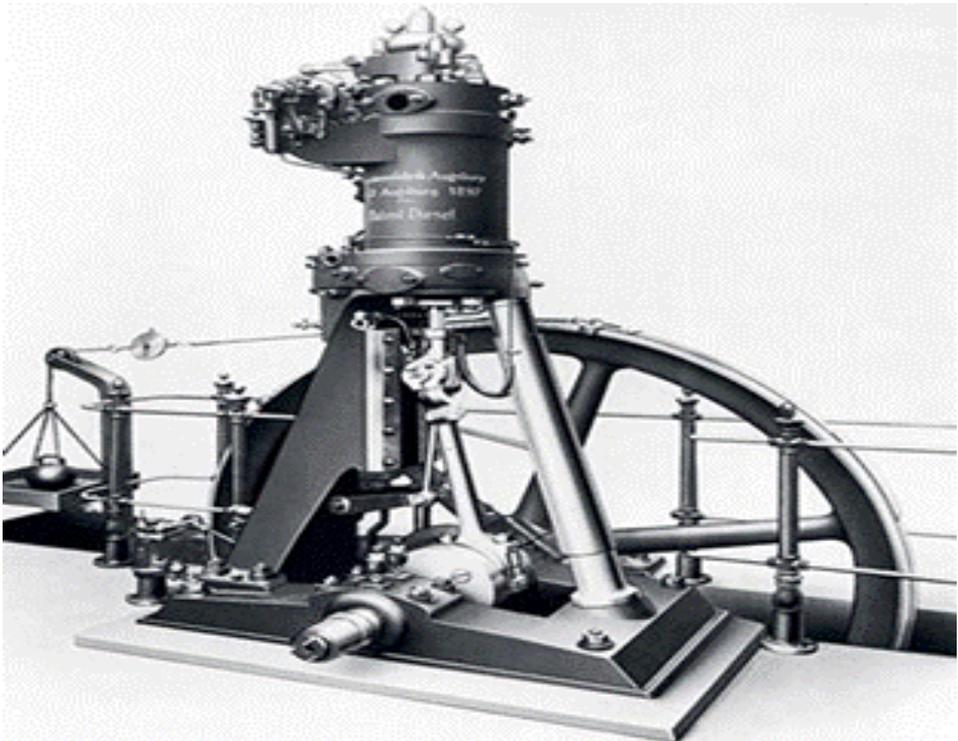
Los resultados obtenidos dieron lugar a la máquina ideal que lleva su mismo apellido (conocida también como ciclo de Carnot), que dio origen teórico al motor de combustión interna. Estos estudios fueron la base, principalmente, del motor diésel.

En este trayecto de la historia, tuvieron lugar varias investigaciones por parte de algunos personajes de ciencia, además de apoyos diversos de em-

presarios comprometidos, lo que permitió superar complicaciones técnicas en la carrera por construir un motor de combustión interna práctico.

En 1867 Nicolas Otto presentó el primer motor a gasolina que se empezaría a comercializar (figura 8). La tecnología y las facilidades operativas de esta máquina fueron mejorando poco a poco; sin embargo, había un gran inconveniente: el combustible utilizado sólo se vendía en farmacias. Además, el arranque de estos motores se convirtió en una seria dificultad.

Figura 8. *El primer motor a gasolina*



La tarea de hacer girar una manivela que proporcionara rotación inicial al volante de inercia y, por lo tanto, al cigüeñal y a todos los mecanismos unidos a éste, era bastante peligrosa para cualquier conductor.

Esto propició que su comercialización estuviera deprimida durante varios años. Rudolph Diesel, en 1892, presentó su motor térmico, con el cual buscaba desarrollar una alta compresión del aire mediante un émbolo que

subiría dentro de un cilindro, a efecto de alcanzar una alta temperatura de ignición, para inyectar inmediatamente un combustible aceitoso, el cual encendería, empujando bruscamente el émbolo hacia su posición inferior, y con ello generaría fuerza rotacional, o par motor, a un elemento conocido como cigüeñal.

Con el motor diésel se procuró resolver diversas desventajas operativas del motor de ciclo Otto, como la compleja accesibilidad, el bajo poder calorífico y alto el precio de la gasolina, y la ignición de la mezcla aire-combustible sin necesidad de una fuente externa de encendido (la bujía) e incrementar la eficiencia térmica del sistema.

Estos objetivos se lograron a costa de su gran tamaño y peso, además de lo complicado que resultaba el sistema de alimentación de combustible, por lo que, al principio, no fue posible adaptar el motor diésel en aplicaciones de transporte de personas y mercancías. Sin embargo, a partir de 1897 se comercializó, con gran éxito, en instalaciones estacionarias, por aquellas empresas que compraron la patente y que hoy en día siguen construyendo este motor.

Mientras tanto, el motor eléctrico, aunque todavía con bajas velocidades, no presentaba las limitantes térmicas y operacionales de los otros motores. Su problema eran las baterías para darle suficiente autonomía. La majestuosidad de su funcionamiento significaba una gran solución para el transporte. El mejoramiento de los procesos termodinámicos en el interior de los motores térmicos siguió avanzando. Karl Benz, en 1895, patentó el radiador para evitar que el agua que se utilizaba para enfriar su motor se evaporara con rapidez, lo que mejoró su eficiencia térmica.

Ya desde entonces gran parte de la energía que se producía durante la combustión en este motor se desperdiciaba en calor. El problema de arranque en los motores de combustión interna se resolvió hasta 1911, con la invención, por parte del ingeniero estadounidense Charles Franklin, de un motor eléctrico (realmente son dos mecanismos eléctricos encimados e interconectados de manera brillante) conocido como “marcha” o motor de arranque.

Con este paso gigante, ocurrió en la historia una terrible paradoja. Con la solución al problema de arranque que aportó la marcha, la iniciativa de fabricación masiva del vehículo Ford, modelo “T”, con motor a gasolina, que

impulsaría Henry Ford en 1914, y el inicio de la comercialización masiva de la gasolina en la década de 1920, el motor eléctrico pasó al olvido en sus aplicaciones vehiculares.

En 1927 Robert Bosh resolvió el problema de suministro de combustible del motor diésel al inventar un sistema de inyección compacto, ligero y gobernado. Esta innovación por fin le daba viabilidad en aplicaciones de transporte de camiones de grandes dimensiones, por su gran fuerza de torque, por su encendido de la mezcla aire/combustible, sin necesidad de una bujía, y por su mayor eficiencia energética respecto del motor a gasolina, además de que resultaba menos contaminante y más barato.

En paralelo, se inventó y se desarrolló un pequeño turbocargador (o “turbo”) que se instaló al final del múltiple de escape para aprovechar la inercia de los gases de escape e impulsar un pequeño compresor, cuya función es introducir más aire al motor; pues la falta de aire suficiente es uno de los factores de la ineficiencia de la combustión en los motores térmicos que disminuyen la potencia e incrementa la contaminación.

Esta iniciativa permitió reducir el tamaño y el peso e incrementar el rendimiento operativo del motor diésel, proliferando a gran escala en pequeños vehículos familiares, principalmente en los países europeos. Más tarde, el turbo también fue aprovechado por los vehículos a gasolina, lo mismo que varias características propias de aquel motor, como el incremento de la compresión y la inyección directa de combustible, lo cual ha permitido reducir el tamaño de éstos y obtener un mayor rendimiento.

Grandes innovaciones se han registrado en la industria automotriz para mejorar la eficiencia de ambos motores. Gran parte de todas ellas han normalizado, para bien de la industria, su comercialización y su consumo.

Por ejemplo: el uso de nuevos materiales para su fabricación; la oxidación, reducción y limpieza de los gases de escape; la incorporación de la mecatrónica en todos sus sistemas para lograr mayores economías de combustible y mejorar su eficiencia energética; la adaptación de tecnologías de cuarta y quinta generación en el funcionamiento, monitoreo y control, en tiempo real, de todos los procesos del vehículo, entre otras.

Acompañado de lo anterior, han sucedido importantes iniciativas en diversos países que complementan brillantemente el escenario automotriz, como la utilización del aire comprimido para la tracción; la inyección de

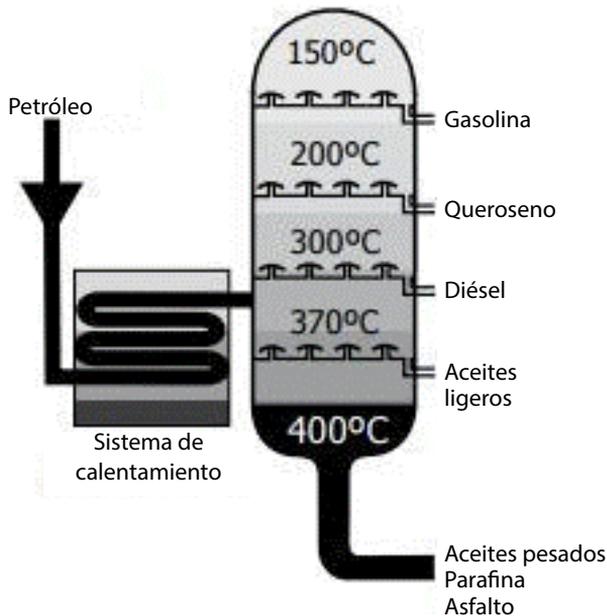
hidrógeno; el uso de etanol, agua de mar, gas natural y gas licuado de petróleo como combustible, además de otras iniciativas importantes.

Es un hecho que la innovación y las grandes inversiones en esta industria han contribuido al producto interno bruto de los países y han prolongado la vigencia de millones y millones de motores de combustión interna en el mundo. Empero, hay un reconocimiento tácito en el campo de la innovación, la investigación y el desarrollo tecnológico: nos estamos acercando a la frontera de mejora técnica de estos motores.

¿De dónde vienen los combustibles fósiles? (44)

La primera etapa de procesamiento del crudo consiste en realizar la separación física de los hidrocarburos presentes en el petróleo, en función de sus puntos de ebullición. Para ello se introduce en una columna de destilación donde se aplican temperaturas elevadas (figura 9).

Figura 9. Columna de destilación del petróleo



Los componentes más ligeros, como los gases, se concentran en la parte más alta de la columna, mientras que los más pesados, como los lubricantes o el asfalto, quedan en la parte más baja.

Los combustibles que se obtienen del petróleo son mezclas de hidrocarburos formadas por átomos de carbono e hidrógeno y presentan arreglos variadísimos, aun si tienen el mismo número total de átomos. En los hidrocarburos, los átomos de carbono están unidos entre sí en forma de cadena lineal, cadena ramificada y cadena cerrada (ciclo); además, estas cadenas de átomos de carbono están saturadas de átomos de hidrógeno.

En el caso de la gasolina, los hidrocarburos que la forman poseen desde cuatro hasta 10 átomos de carbono, de 10 a 14 para el queroseno (gas avión), y en el caso del diésel, de 15 a 22 átomos de carbono. Sin embargo, muy pocos componentes que salen de la columna de destilación fraccionaria están listos para el mercado.

Muchos de ellos requieren un mayor procesamiento químico. Las fracciones destiladas y químicamente procesadas luego son tratadas para remover las impurezas, tales como compuestos orgánicos que contienen azufre, nitrógeno, oxígeno, agua, metales disueltos y sales inorgánicas. Después de ser tratadas, las fracciones son enfriadas y luego mezcladas para elaborar diversos productos. Eventualmente, algunos de estos productos son traídos por barco, ducto, ferrocarril o camión hasta una de las terminales.

Motores de combustión interna

Los problemas que ha generado la contaminación ambiental en la actualidad han obligado a la sociedad a tomar acciones orientadas a la mitigación o atenuación de lo que les da origen. El transporte no está exento de estas acciones, siendo las emisiones un tema particularmente relevante por ser el producto de la combustión generada en los motores al crear la energía para producir el movimiento de los vehículos.

Desde su invención, los motores de combustión interna se han convertido en la principal fuente de energía mecánica, pues a nivel mundial producen más de 80% mediante este medio. Atendiendo a su encendido, los motores de combustión interna se dividen en encendido por chispa, que

funcionan principalmente con gasolina y gas natural, y encendido por compresión, que emplean como combustible el diésel.

Como principio de funcionamiento, transforman la energía química contenida en el combustible (en su mayoría fósiles) a energía mecánica. Sin embargo, de la necesaria combustión se generan productos nocivos para la salud, como los gases que contaminan y alteran el medio ambiente. Los productos derivados de la combustión agrupan al dióxido y al monóxido de carbono, al dióxido de azufre (SO_2), a los óxidos de nitrógeno (NO_x) y diverso material particulado.

Formación de contaminantes

La combustión es una reacción química de oxidación en la que un elemento combustible (en este caso, hidrocarburos que forman la gasolina o el diésel), se combina habitualmente con oxígeno. Esta combinación da lugar a una serie de productos de reacción y a una gran cantidad de calor.

Los hidrocarburos se componen únicamente por carbono e hidrógeno, por lo que su combustión total con oxígeno resulta únicamente en CO_2 y agua. Sin embargo, debido a que el aire atmosférico, además de 21% de oxígeno, contiene 78% de nitrógeno y 1% de otros gases, inevitablemente se forman otros productos, como los NO_x .

Además, parte de los hidrocarburos no se queman durante la combustión y se emiten a la atmósfera en forma de CO, de hidrocarburos no quemados y de partículas. En el caso de los motores encendidos por chispa, los contaminantes vertidos a la atmósfera son, por orden de importancia, CO_2 , CO, hidrocarburos no quemados y NO_x . Del mismo modo, en los motores de encendido por compresión, el CO_2 es el principal contaminante; le siguen los NO_x , que ocupan una situación similar a la de la materia particulada.

¿Cuánto CO₂ emiten los coches de gasolina y diésel?

Para responder esta pregunta hay que saber que un litro de gasolina que pesa unos 750 gramos está compuesto por 87% de carbono, lo que viene siendo 652 gramos de carbono por cada litro de gasolina.

Para efectuar la combustión de la gasolina, un motor necesita 1740 gramos de oxígeno por litro. Habría que sumar los 652 gramos del combustible a los 1740 gramos de oxígeno. Esto daría como resultado 2392 gramos de CO₂ por litro de gasolina.

Si el coche consume una media de seis litros cada 100 kilómetros habría que multiplicar esos 2392 gramos por los seis litros y dividirlos entre 100 km para saber el CO₂ generado por kilómetro.

Un coche de gasolina que consuma seis litros cada 100 kilómetros emite una media de 14352 gramos de CO₂ cada 100 km, lo que viene siendo 143 gramos de CO₂ por cada kilómetro recorrido.

A diferencia del litro de gasolina, el de diésel pesa 835 gramos. El diésel está compuesto por 86.2% de carbono, lo que viene siendo 720 gramos de carbono por litro de diésel. Para convertirlo en CO₂ se necesitan 1920 gramos de oxígeno. Si efectuamos la misma operación y sumamos obtenemos 2640 gramos de CO₂ por cada litro de diésel.

En un diésel que tenga un consumo medio de cinco litros por 100 km tendríamos que por cada 100 km este coche diésel emite 13200 gramos de CO₂, lo que viene siendo 132 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido. De estos resultados se desprende la necesidad de descarbonizar los combustibles empleados en el transporte, recurriendo a otros carburantes que tengan menor cantidad de átomos de carbono en su composición.

Riesgos para la salud

Según cálculos de la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 1.3 millones de personas mueren cada año de forma prematura como consecuencia de la contaminación atmosférica urbana. Una alta presencia de CO₂

en el aire contribuye a empeorar su calidad y la afectación a las condiciones climáticas repercute directamente en la salud humana. Lo mismo ocurre con los hidrocarburos no quemados.

El metano, por ejemplo, tiene un potencial de calentamiento global de 23, lo que significa que en un periodo de 100 años un kilogramo de metano tiene la capacidad de calentar la Tierra 23 veces más que un kilogramo de CO_2 . No obstante, el CO_2 y los hidrocarburos no quemados son responsables directos del calentamiento global y, por lo tanto, de todas las patologías y las catástrofes asociadas a éste.

El NO_x es el término genérico para referirse a todos los óxidos de nitrógeno. El NO_2 y el NO_3 son gases altamente reactivos, capaces de reaccionar con diversas sustancias orgánicas volátiles que se encuentran en la atmósfera, bajo la presencia de la luz solar y el calor. Su reacción da como resultado el denominado ozono troposférico (O_3).

Aunque el ozono no es un contaminante en sí mismo, pues forma parte de la composición natural de la atmósfera y es el principal responsable de contener a los rayos UV que provienen del sol, su presencia a baja altura sí resulta perjudicial para el ser humano. (44)

En esa condición causa irritaciones en el aparato respiratorio, el agravamiento de alergias respiratorias y diversas enfermedades crónicas. Adicionalmente, los óxidos de nitrógeno contribuyen activamente a la acidificación del agua en el proceso conocido como *lluvia ácida*, cuya capacidad para reaccionar con compuestos de la atmósfera deriva en la generación de numerosos agentes mutagénicos y cancerígenos que se encuentran presentes en el aire que se respira cada día.

La combustión incompleta de hidrocarburos produce también el CO, que es capaz de pasar a la sangre a través de las vías respiratorias, donde se combina con la hemoglobina, formando la carboxihemoglobina que bloquea el transporte de oxígeno a través del cuerpo.

También en la combustión se generan partículas que son capaces de introducirse al sistema respiratorio, donde las más finas (menores de $2.5 \mu\text{m}$) pueden abrirse paso hasta las zonas más profundas. Son causantes directas de un gran número de muertes prematuras, así como de disfunciones en el sistema respiratorio. Se relacionan directamente con el asma y en los niños pueden contribuir a un mal desarrollo de la capacidad pulmonar. Además

de sus efectos directos, pueden servir como medio de transporte para otras sustancias nocivas. (44)

La descarbonización del sistema energético

La descarbonización es el proceso de reducción de emisiones de carbono a la atmósfera. Su objetivo es lograr una economía global con bajas emisiones que consiga la neutralidad climática a través de la transición energética. Para lograr la descarbonización es necesaria la transición energética, un cambio estructural que elimine el carbono de la producción de energía.

Se trata de electrificar la economía con base en energías alternativas limpias que emitan únicamente lo que el planeta puede absorber. Para llevar a cabo la descarbonización, todos los aspectos de la economía deben cambiar, desde la forma como es generada la energía y se producen y transportan los bienes de consumo, hasta cómo se administra la tierra. Un aspecto de la descarbonización radica en reducir los gases de efecto invernadero producidos por la combustión de combustibles fósiles.

La eficiencia energética reducirá la demanda de energía, pero la electrificación creciente hará que la demanda se duplique en 2050 respecto de los valores actuales. Consecuentemente, la descarbonización requerirá que se absorba el carbono de la atmósfera, capturando sus emisiones y mejorando su almacenamiento en las tierras agrícolas y en los bosques.

Veamos a continuación los sitios donde se generan los contaminantes y cómo descarbonizarlos:

• *Generación de energía*

La generación de potencia, incluida la producción de electricidad y calor, es responsable de 30% de las emisiones globales de CO₂ porque en su generación están implícitos los combustibles fósiles, que deberán reemplazarse por energías renovables.

Las fuentes renovables hoy en día son rentables y representan una gran mayoría de las nuevas capacidades de generación de energía. Las plantas

carboeléctricas deberán ser retiradas o condicionadas para capturar el 90% de sus emisiones de CO₂. Las plantas de energía también deberán ser más eficientes, pues dos tercios de la energía consumida para generar electricidad se pierde como calor desperdiciado

• *Industria*

Los procesos industriales como el del acero, el del cemento y el de la producción de químicos, así como la extracción y la refinación del petróleo y el gas producen 30% de las emisiones globales de CO₂ y 33% de las de metano. Este sector es uno de los más difíciles de descarbonizar porque se requieren temperaturas de 1600 °C o más, que se alcanzan con la combustión de fósiles, pero que son difíciles de alcanzar vía la electrificación. Para descarbonizar realmente la industria es indispensable rediseñar los procesos de producción.

• *Transporte*

La transportación, incluyendo la marítima y la aviación, genera 19% de las emisiones de CO₂. Ciertos países se han autoimpuesto metas para cumplir la meta de las emisiones casi a cero para el año 2030, lo que significa que los vehículos serán eléctricos, impulsados por energías renovables o con celdas de hidrógeno.

La aviación, responsable de 2% de las emisiones globales, es considerada el sector más difícil de descarbonizar; sin embargo, se pueden reducir sus emisiones mejorando el manejo del tráfico aéreo. Por ejemplo, empleando rutas más directas y viajando a velocidades óptimas y, eventualmente utilizando combustibles alternativos como los biocombustibles o el hidrógeno verde.

El transporte marítimo que produce 2.5% de las emisiones emplea gasóleo pesado, que es más barato que los combustibles alternos, por lo que es posible que en el futuro cercano se empleen combustibles de bajo contenido de carbono.

• *Edificios*

Los edificios son responsables de 6% de las emisiones de CO₂. Parte de esas emisiones se contabilizan a partir de la obtención, el procesamiento, la manufactura, el transporte y la instalación de los materiales que lo constituyen. Otras emisiones son generadas por los edificios mediante los sistemas de calentamiento, el aire acondicionado, los aparatos de limpieza, etcétera.

En los edificios nuevos, las emisiones se reducirán al emplear, por ejemplo, madera obtenida de bosques sostenibles, materiales reciclables no tóxicos y cemento que incorpora al CO₂, sin olvidar el uso de paneles solares como fuente de energía.

• *Agricultura y uso de la tierra*

La agricultura emplea energía que genera 1% de las emisiones de CO₂ y 38% de las del metano, en su mayoría provenientes del ganado. En muchos países, la mayor fuente de contaminación del agua es la agricultura —no las ciudades ni la industria—, mientras que, a nivel mundial, los contaminantes químicos más comunes en los acuíferos subterráneos son los nitratos procedentes de la actividad agrícola.

La agricultura moderna es responsable del vertido de grandes cantidades de agroquímicos, materia orgánica, sedimentos y sales en los cuerpos de agua. La agricultura es el mayor productor de aguas residuales, por volumen; por su parte, el ganado genera muchas más excreciones que los seres humanos. A medida que se ha intensificado el uso de la tierra, los países han aumentado enormemente el uso de pesticidas sintéticos, fertilizantes y otros insumos.

Si bien estos insumos han ayudado a impulsar la producción alimentaria, también han dado lugar a amenazas ambientales, así como a posibles problemas de salud humana. Los contaminantes agrícolas más preocupantes para la salud humana son los patógenos del ganado, los plaguicidas, los nitratos en las aguas subterráneas, los oligoelementos metálicos y los contaminantes emergentes, incluidos los antibióticos y los genes resistentes a los antibióticos excretados por el ganado.

Cómo afecta la agricultura

El auge de la productividad agrícola mundial que siguió a la Segunda Guerra Mundial se logró en gran parte a través del uso intensivo de insumos, como plaguicidas y fertilizantes químicos.

Mientras tanto, la intensificación de la producción pecuaria —el número mundial de cabezas de ganado se ha triplicado desde 1970— ha visto surgir una nueva clase de contaminantes: antibióticos, vacunas y promotores hormonales del crecimiento que viajan a través del agua desde las granjas hasta los ecosistemas y al agua que bebemos.

Al mismo tiempo, la contaminación del agua por materia orgánica procedente de la ganadería hoy está mucho más extendida que la contaminación orgánica derivada de las áreas urbanas. Y otro sector en auge, la acuicultura (que se ha multiplicado por 20 desde 1980), ahora está liberando cantidades cada vez mayores de excrementos de peces, piensos no consumidos, antibióticos, fungicidas y agentes antiincrustantes en las aguas superficiales.

Las emisiones se pueden reducir con prácticas más sustentables, como la agricultura regenerativa que aumenta el almacenamiento de carbono en el suelo y protege la biodiversidad. Haciendo sustentable y resiliente la cadena alimenticia, se hará una contribución significativa al éxito que se tenga en los temas de biodiversidad y clima. Globalmente, el sistema alimentario es responsable de 80% de la deforestación y de 70% del uso de agua fresca y la causa principal de la pérdida de biodiversidad

La descarbonización del sector transporte

La Identidad de Kaya, formulada por el economista energético japonés Yoichi Kaya en 1993, relaciona el CO₂ emitido por la actividad humana con el producto de cuatro variables, consideradas a escala global: 1) la población, 2) el producto interior bruto (PIB) per cápita, 3) la energía utilizada por unidad de PIB (o intensidad energética) y 4) las emisiones de CO₂ emitidas por unidad de energía consumida (o intensidad de carbono del energético). Para que el resultado final de la multiplicación de los cuatro factores sea

cero, basta con que uno de ellos lo sea. Pero, hoy por hoy, este supuesto constituye un sueño aparentemente lejano que pasa por la investigación y el desarrollo. (45)

Para lograr un progreso sostenido en nuestras sociedades necesitamos avances sustantivos en las cadenas que suplen los bienes de consumo, para lo cual es preciso incrementar la logística del transporte de pasajeros y de carga, lo que convierte el transporte en uno de los sectores de mayor demanda energética que consume un porcentaje elevado de la energía generada.

Este sector utiliza grandes cantidades de combustibles fósiles, principalmente gasolina y diésel. El aumento sustantivo del número de vehículos fabricados alrededor del mundo y la automatización de la industria de fabricación de vehículos ha provocado un elevado aumento en la huella de carbono, que provoca que el sector transporte sea uno de los mayores contaminantes.

El rápido progreso en la transformación del sector se manifiesta en la población de vehículos a nivel mundial que sobrepasa los 1000 millones. Se estima que para el año 2050 el número de kilómetros recorridos por año en los sectores de pasajeros y carga será el doble del actual, lo que se traduce en una demanda de necesidades de petróleo de alrededor de 99 millones de barriles diarios, lo que incrementa la preocupación por las consecuencias ambientales. Los países han acordado incrementar la venta de vehículos eléctricos a 35% del total de ventas para el año 2030.

Las energías renovables deben convertirse en combustibles de alta densidad energética, tales como la electricidad y el hidrógeno, para ser implementadas en el transporte, lo cual hace imperativo producir y distribuir la electricidad y el hidrógeno en cantidades adecuadas para el uso vehicular inmediato y fabricar vehículos avanzados que puedan funcionar con estos combustibles de alta densidad.

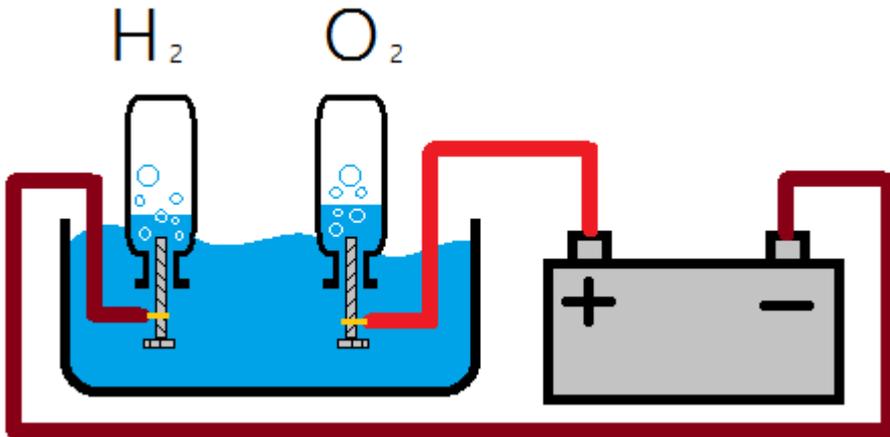
Por lo tanto, el uso de biocombustibles, vehículos eléctricos e hidrógeno es promovido por ambientalistas, estrategias y gobiernos como métodos para disminuir las emisiones de gas de efecto invernadero.

Hidrógeno verde: un combustible sin emisiones contaminantes

A pesar de que el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, es uno de los gases de proporciones muy pequeñas en nuestra atmósfera, presente en trazas (0.6 partes por millón). Sin embargo, se puede sintetizar en cantidades requeridas por métodos químicos, electroquímicos (electrólisis del agua) y bioquímicos, que pueden almacenarse para un uso futuro (figura 10).

El hidrógeno verde más intensivo en agua también utiliza casi un tercio menos de agua por kilogramo de hidrógeno producido, en comparación con el azul, que se fabrica por medio de gas natural con captura y almacenamiento parcial de carbono.

Figura 10. La electrólisis del agua



La oxidación atmosférica del hidrógeno produce energía y vapor de agua, lo que lo hace un combustible limpio. No obstante, existen algunas interrogantes sobre la viabilidad del hidrógeno verde por su alto costo de producción; dudas razonables que se disiparán conforme avancen la descarbonización del planeta y, en consecuencia, se abarate la generación de energía renovable.

Impulsados por el uso de esta fuente de energía, capaz de transformar el sector transporte, las compañías fabricantes de automóviles han desarrollado celdas de combustible a base de hidrógeno para mover los autos.

Las celdas de combustible son aparatos capaces de transformar la energía química del hidrógeno en una forma útil de electricidad que moviliza los autos. Siempre y cuando se le aporte hidrógeno, la celda generará continuamente fuerza de alta eficiencia. La única diferencia entre una celda de combustible y una batería es que la primera genera electricidad del hidrógeno almacenado, en contraste con la batería, que almacena una carga eléctrica.

Sin embargo, existen varios retos tecnoeconómicos, ambientales y psicológicos a los que hay que enfrentarse si se desea comercializar los autos a base de hidrógeno. La tecnología de las celdas de combustible es cara pues requiere el uso de metales como el platino y, además, emplea membranas también caras, lo que hace que por el momento no compita con los vehículos tradicionales ni con aquellos que funcionan a base de electricidad.

No sólo el costo es un reto sino también lo relacionado con la generación, el almacenamiento y la distribución del hidrógeno en estaciones de servicio.

Ventajas y desventajas del hidrógeno verde

Esta fuente de energía tiene puntos a favor y en contra que debemos conocer. Primero repasemos algunos de sus aspectos positivos más relevantes:

- *100% sostenible*: el hidrógeno verde no emite gases contaminantes ni durante la combustión ni durante el proceso de producción.
- *Almacenable*: el hidrógeno es fácil de almacenar, lo que permite su utilización posterior en otros usos y en momentos distintos al de su producción.
- *Versátil*: el hidrógeno puede transformarse en electricidad o en combustibles sintéticos y utilizarse con fines comerciales, industriales o de movilidad.

Pese a todo, el hidrógeno verde también tiene aspectos negativos que conviene recordar:

- *Mayor costo:* la energía procedente de fuentes renovables, clave para generar hidrógeno verde a través de la electrólisis, es más cara de generar, lo que a su vez encarece la obtención del hidrógeno.
- *Mayor gasto energético:* la producción del hidrógeno en general y del verde en particular requiere más energía que otros combustibles.
- *Atención a la seguridad:* el hidrógeno es un elemento muy volátil e inflamable, por lo que requiere unos requisitos de seguridad elevados para evitar fugas y explosiones.

Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos (VE) son automóviles propulsados por uno o más motores eléctricos cuya fuerza proviene de generadores batería/celda de combustible y se visualizan como sucesores de los vehículos de combustión interna. Son vehículos de cero emisiones y antes habían movilizadcoches a batería, desde 1900 (propulsados por baterías de plomo-ácido), pero su bajo contenido energético y la ineficiencia de las baterías hizo que paulatinamente fueran sustituidos por vehículos a gasolina.

Sin embargo, en épocas recientes, la dependencia de muchos países respecto de la electricidad, comparada con la del petróleo o el hidrógeno, ha hecho que la electrificación del sector transporte sea un método efectivo de descarbonización. El componente más importante que distingue a los VE de los autos a gasolina es la batería, que también influye en el precio de estos vehículos.

Comparada con las baterías de los autos convencionales, las de los VE poseen una química diferente y mayor densidad energética y eficiencia. Dependiendo del papel que tiene la batería en el vehículo, los VE pueden ser híbridos con una máquina de combustión interna y una batería que adicionalmente provee poder al vehículo.

Sin embargo, con todas sus bondades —como una mayor conciencia del público respecto de la contaminación vehicular y sus consecuencias—, los gobiernos que apoyan la reducción de contaminantes concediendo beneficios fiscales al comprar esos vehículos, la venta de VE es lenta en muchas partes del mundo.

Para satisfacer una demanda muy grande de VE en el futuro se requiere una gran cantidad de baterías, motores y otros equipos adicionales para la propulsión que estará limitada por una variedad de metales empleados en su fabricación, lo que puede ser un factor crítico y limitante.

Cero emisiones

La política climática tiene hoy en día un nuevo enfoque: cero emisiones netas. ¿Qué significa “cero emisiones”? Dicho de forma sencilla, implica recortar las emisiones de gases de efecto invernadero hasta dejarlas lo más cerca posible a las emisiones nulas, con algunas emisiones residuales que sean reabsorbidas en la atmósfera, por el océano y por los bosques, por ejemplo.

Históricamente, las metas habían sido formuladas en términos de estabilizar las concentraciones atmosféricas o de reducir un cierto porcentaje de emisiones. Cero emisiones es, intrínsecamente, un concepto científico.

Si el objetivo es mantener la elevación de la temperatura bajo ciertos límites, la física implica que hay una cantidad finita de dióxido de carbono a la que se le permite irse a la atmósfera acompañada de otros gases de efecto invernadero. Sobrepasar ese límite debe ser balanceado por la confinación del gas. Sin embargo, el cero neto de emisiones es mucho más que un concepto científico o un objetivo determinado técnicamente.

Alcanzar cero emisiones requiere operar en esferas sociales, políticas y económicas. Hay numerosos juicios éticos, preocupación social e intereses económicos que deben navegarse para no echar a perder el propósito que se persigue. El cero neto sólo es un número con el cual se inicia la pregunta clave: cero neto, ¿qué? Para el CO₂ la respuesta surgió en los últimos años del siglo pasado para entender que se necesitaba para detener el incremento de la temperatura en la superficie del planeta.

El balance de carbono calculado por los científicos se aplica a la atmósfera global en lugar de aplicarlo a entidades individuales. Para llegar a cero emisiones es necesario que dichas necesidades se transmitan a las naciones, compañías y otras organizaciones. Existe preocupación de que la disminución de emisiones voluntaria pueda no ser consistente con el cero neto de emisiones que se persigue a nivel global.

Atributos para verdaderas cero emisiones

Existen diferentes caminos para disminuir las emisiones; sin embargo, hay razones científicas y económicas para que la reducción deba hacerse lo más rápido que se pueda. El cambio global de la temperatura está determinado por las emisiones acumuladas, es decir, por el total de las emisiones en el tiempo y no por las aisladas en un punto particular en el tiempo. Por lo tanto, importa la rapidez con que esas emisiones se reduzcan.

Los científicos han demostrado que cada año que pasa sin iniciar la reducción de las emisiones, disminuye en dos años el tiempo disponible para alcanzar cero emisiones. El declive de los costos de la energía renovable ha sido profundo, por lo que la transición a electricidad de cero carbonos progresa, si bien en la industria automotriz el desarrollo de vehículos de cero emisiones aún es lento

Debe haber cautela en la remoción del dióxido de carbono, pues su eliminación está constreñida por consideraciones geopolíticas, biológicas, geológicas y tecnológicas que limitan la capacidad de removerlo de la atmósfera y confinarlo de manera segura y permanente.

Si el confinamiento es biológico, vías grandes plantíos, a menudo de especies de árboles exóticos, existe la preocupación de alterar eventualmente otros servicios que presta el ecosistema y la permanencia del carbono en el lugar dada la vulnerabilidad que tienen estas estrategias a peligros como, por ejemplo, la fluctuación del clima, el fuego y los patógenos.

En el caso del confinamiento geológico, el riesgo de llevarlo a cabo es menor, pero hay preguntas aún sin contestar acerca la velocidad apropiada de inyección y la respuesta geomecánica del reservorio.

La crónica de los biocombustibles

A. Bioenergía

Según la mitología griega, dos titanes —Prometeo y su hermano Epimeteo— tenían encomendada la tarea de proporcionar a cada animal un poder que

les ayudara en su lucha por la supervivencia. Las serpientes recibieron colmillos para inyectar veneno; los osos, una enorme fuerza, y las gacelas, una gran velocidad. Pero cuando llegó el turno del hombre, ya no quedaban poderes por distribuir. Conmovido por su desamparo. Prometeo robó el fuego a los dioses y se lo dio a los seres humanos. Encolerizado, Zeus, el rey del Olimpo, encadenó al Titán a una montaña, donde permaneció hasta que Hércules lo liberó. Con el mito de Prometeo, los griegos expresaron la gran importancia que tenía el fuego en sus vidas.

Con anterioridad al fuego, la potencia de los seres humanos se fundaba en la fuerza de sus músculos. El “descubrimiento” y el control del fuego cambió el día a día del hombre primitivo, permitiéndole ver en la oscuridad, calentarse, mantener a raya a los predadores, cocinar, secar y endurecer la madera, así como acceder al uso de los metales.

¿Cuándo se produjo “el regalo” de Prometeo? Las primeras pruebas de la utilización del fuego por los seres humanos provienen de China y se remontan unos 500 000 años en el pasado

Por el año 30 000 antes de nuestra era, los seres humanos emplearon por primera vez el carbón que se forma por la pirólisis lenta de la madera. En los tiempos de Alejandro el Grande, el carbón era bien conocido y se empleaba en la fundición de minerales. Teofrasto (371-287, antes de nuestra era) también lo describe, y asimismo el gran naturalista romano Plinio lo caracteriza como una piedra (antracita) que se encuentra en el noroeste de Grecia y que recuerda al carbón.

En la Era de Bronce se empezó a emplear el carbón en la metalurgia del cobre y el hierro y fue nombrado combustible gubernamental para cocinar y calentarse en la dinastía Tang en el año 700 de nuestra era.

La gasificación de la madera generó el primer biocombustible líquido vegetal, empleado en lámparas de arcilla. Heródoto (484-425) describió el antiguo Festival de las Lámparas en Egipto, donde en la noche de los sacrificios todo el mundo quemaba aceites al aire libre. De acuerdo con la mitología griega, se llevó a cabo un famoso torneo entre Atenea y Poseidón para saber quién sería el protector de Atenas. La reina ganó debido a que fue la primera en plantar un árbol de olivo.

En resumen, durante milenios, los seres humanos obtuvieron los alimentos, el calor y la potencia mecánica necesarios para su supervivencia de

la radiación solar y de su transformación casi inmediata (flujos de agua y viento), así como de la energía proporcionada por conversiones metabólicas y de la biomasa que ocurrían en cuestión de meses, en unos pocos años o, a lo sumo, en unas pocas décadas.

Por el contrario, los combustibles fósiles, con la excepción de la turba, son consecuencia de intensos cambios de la biomasa durante lapsos de tiempo geológicos.

Utilizando un símil económico podemos considerar que para su desarrollo las sociedades premodernas dependían de unos ingresos solares, instantáneos o mínimamente retardados, que se reponían de manera constante. En cambio, la civilización moderna basa su esplendor en el uso de una herencia solar, un capital del que no estamos haciendo uso a gran velocidad.

Antes de la Revolución industrial, el desarrollo de las sociedades humanas quedaba acotado por la tasa a la que éstas eran capaces de aprovechar la radiación solar y sus transformaciones al incidir sobre el planeta. Los rendimientos medios de los cultivos eran bajos, lo que ocasionaba desnutrición crónica y hambrunas recurrentes, mientras que el almacenamiento de la energía estaba seriamente coartado por la baja densidad energética de la biomasa.

La extracción a gran escala y la combustión de carbón, petróleo y gas natural significaron un cambio fundamental en el tipo y la intensidad de los usos de la energía. Los tres hidrocarburos citados abarcan un amplio muestrario de moléculas orgánicas, generadas tras un complejo y largo proceso: la lentísima transformación, durante periodos de 100 000 a 100 millones de años, de la materia orgánica inicialmente sintetizada por la fotosíntesis en la biosfera y luego acumulada como detritus vegetales y animales en el fondo de cuencas sedimentarias (lagos, mares y océanos).

B. Etanol para iluminación

Por el año 1100, el etanol fue el primer biocombustible líquido producido por el hombre, aunque inicialmente no fue empleado para ese propósito. La producción de alcohol por fermentación también se remonta a los inicios de la civilización. El vino era una bebida popular entre los antiguos egipcios.

Después del Diluvio, Noe primero plantó un viñedo y, según la mitología griega, el dios Dionisio estaba asociado al vino.

La destilación del alcohol es necesaria para producir un combustible, lo cual fue realizado en el siglo IX por los alquimistas árabes. Si bien un estudio detallado de la destilación y el descubrimiento del proceso se atribuye a Magister Salernus (fallecido en 1167) que llamó *aqua ardens* al producto destilado, el cual contenía suficiente alcohol para ser quemado.

C. Biogás

En 1630 Jan Baptiste van Helmont (1580-1644) dio cuenta de un gas inflamable que provenía de la descomposición de vegetales. Entre sus numerosos experimentos relacionados con la química, observó que en ciertas reacciones se liberaba un fluido “aéreo”; así demostró que existía un nuevo tipo de sustancias con propiedades físicas particulares, a las que denominó “gases” (del griego *kaos*). También se dio cuenta de que la sustancia (que hoy se conoce como dióxido de carbono) que era liberada al quemar carbón, era la misma producida durante la fermentación del mosto o jugo de uva.

En 1808 el notable químico Humphrey Davy (1778-1829) llevó a cabo un estudio pionero sobre la fermentación del estiércol y descubrió que se formaba “ácido carbónico” (CO_2), cuyo residuo era una mezcla de “hidrocarbonatos”. A inicios de 1900 surgieron varias aplicaciones para usar el gas obtenido de la fermentación de desechos como combustible.

En 1930 Arthur Bushwell recomendaba que los granjeros instalaran tanques de digestión en los que los residuos de las cosechas podían convertirse en una considerable cantidad de combustible gaseoso de alto valor calorífico.

D. Aceite de ballena

El aceite se movía alrededor del mundo 100 años antes de que se perforara un pozo petrolero. Las grandes ciudades de Europa usaban el líquido para iluminar las calles, aunque se empleaba como materia prima en varias ramas

de la manufactura, como el cuero y el jabón, y también como pintura, en la arquitectura y en la navegación. El aceite de ballena competía con los aceites vegetales, tradicionalmente empleados para la iluminación.

E. Gasificación de la biomasa

El concepto de gasificación fue sugerido por el inventor John Barber (1734-1801) en su pionera patente de una turbina de gas. Seis años después Philippe D'Humbersin (1767-1804) iluminó las calles de París empleando la gasificación de madera. No se sabe hasta dónde tenía pensado llevar esta innovación, ya que fue asesinado en 1804.

F. Hidrólisis ácida etanol-celulosa

Henri Braconnot (1780-1855) trató la celulosa con ácido sulfúrico para producir azúcares fermentables. La primera aplicación comercial de producir etanol a partir de la madera fue un proceso desarrollado por Alexander Classen (1843-1934), en Alemania, en 1900, el cual fue mejorado en Estados Unidos a mediados de 1940. El etanol celulósico también se produjo en el pasado en los molinos de pulpa tratada con sulfitos, donde se fermentaban los azúcares de la madera del licor obtenido.

G. Etanol combustible para el transporte

A principios del siglo xx, el etanol era un combustible automotriz muy popular en Francia y en 1920 se reportaba que el etanol mezclado al 50% con gasolina provocaba problemas en el motor, por lo que se disminuyó su contribución a la mezcla al 25%. Alemania también fue pionera en el uso del alcohol.

En 1899 la Centrale fur Spiritus Verwerthung estableció un programa de subsidios que permitía que el etanol tuviera un precio competitivo respecto de la gasolina.

En Estados Unidos Henry Ford diseñó su primer auto en 1896, el cuadríciclo que operaba sólo con alcohol, siendo el original Modelo T. En 1925, Ford afirmaba que “el combustible del futuro va a provenir de las frutas como el zumaque (arbusto leñoso) o de las manzanas, hierbas, aserrín, casi de cualquier cosa”. El etanol se puede mezclar con la gasolina en cualquier porcentaje hasta 83%. Las mezclas más comunes contienen de 10 a 15% de etanol; el resto es gasolina, si bien hay automóviles que funcionan con 83% de etanol.

H. Biodiésel

El aceite vegetal fue el primer combustible líquido conocido y lo ha sido desde el inicio de la civilización. Freidrich Rochieder (1819-1874) y Patrick Duffy (1829-1887) descubrieron que se podía producir diésel a partir de los aceites vegetales, gracias a una reacción promovida por un catalizador. Rudolph Diesel construyó un vehículo que empleaba aceite de cacahuete en 1900. Más adelante se descubrió que los motores diésel podían funcionar directamente con el aceite vegetal o animal. El biodiésel puro es referido como B100, siendo el B20 (20% biodiésel y 80% gasolina; la mezcla más empleada).

I. Biobutanol

Se le llama biobutanol al alcohol de cuatro carbonos obtenido a partir de biomasa natural, orgánica o biodegradable. Aunque hay algunos problemas para purificarlo, su producción dada por microorganismos ha llamado la atención porque han surgido nuevas tecnologías y aplicaciones biotecnológicas que producen más y mejores rendimientos sin generar productos secundarios. El biobutanol es un biocombustible producido a partir de la fermentación acetona-butanol-etanol.

El biobutanol se produce mediante la fermentación ABE, normalmente empleando microorganismos. Los productos principales son acetona, butanol y etanol, junto con intermedios de reacción (ácido acético y ácido

butírico) y algunos gases (H_2 y CO_2). Este alcohol presenta varias ventajas con respecto al bioetanol; a saber, baja miscibilidad en el agua, baja volatilidad, menor corrosividad y mayor capacidad calorífica. Además tiene la ventaja de sustituir directamente la gasolina sin necesidad de realizar modificaciones al motor.

Materias primas para producir biocombustibles

El cultivo de granos (por ejemplo, maíz, trigo, sorgo y cebada) y de raíz/tubulares (como la cassava, la papa, el cacto, la alcachofa) produce grandes cantidades de harina. La harina nativa aislada de diferentes fuentes puede ser empleada para una posterior conversión de productos bio y en bioetanol. El residuo aislado de la harina contiene proteínas y fibra de gran aplicación en alimentos.

La harina es una mezcla que se hidroliza y produce un jarabe de glucosa que posteriormente se convierte por un hongo en etanol (40-48% en masa). Este paso aumenta el costo de producción si se compara con reactivos que contienen azúcar.

• Caña de azúcar

La caña de azúcar es uno de los cultivos más antiguos del mundo, originaria de Nueva Guinea. Se estima que se cultiva desde el año 3000 antes de nuestra era. Los antiguos navegantes la introdujeron en la India y desde allí se extendió hacia el Oriente y Europa. Los españoles llevaron la planta primero a las Islas Canarias y posteriormente Cristóbal Colón la introdujo a América en 1492.

El cultivo se extendió desde Santo Domingo hacia el Caribe y Sudamérica donde se ha desarrollado con gran relevancia económica, altamente demandado por los consumidores. El tallo es el órgano más importante de la planta, ya que es el lugar donde se almacena la sacarosa (la sacarosa, comúnmente conocida como azúcar de mesa, está formada a partir de dos monosacáridos: la glucosa y la fructuosa, de la cual se obtiene el etanol).

• *Remolacha*

Los ancestros de la remolacha azucarera crecían de manera silvestre en la costa del sur de Europa y Asia y llegaba hasta la India occidental. El cultivo de la remolacha se desarrolla en Francia y en España durante el siglo xv. Se cultivaba por sus hojas, que probablemente eran equivalentes a las de las espinacas y las acelgas. A partir de entonces la raíz ganó popularidad, especialmente la de la variedad roja conocida como remolacha.

En 1747, Andreas Marggraf demostró que los cristales de sabor dulce obtenidos del jugo de la remolacha eran iguales a los de la caña de azúcar. En 1801 se constituyó la primera fábrica de azúcar en Baja Silesia. En 1811 Napoleón mandó plantar 32 000 hectáreas de remolacha, contribuyendo de este modo al establecimiento de las fábricas. En pocos años se constituyeron más de 40 fábricas de azúcar de remolacha, distribuidas en el norte de Francia, Alemania, Austria, Rusia y Dinamarca.

La remolacha está compuesta aproximadamente por 75% de agua, 18% de azúcar y 7% de materiales solubles e insolubles. El azúcar obtenido de la remolacha es básicamente sucrosa, pero también contiene maltosa, glucosa y fructuosa, aunque éstos no interfieren con la fermentación y la destilación de la producción de etanol.

• *El sorgo*

El sorgo quizá sea originario de África central (Etiopía o Sudán), pues es allí donde se encuentra la mayor diversidad de sus tipos. Esta diversidad disminuye hacia el norte de África y Asia. Existen, sin embargo, ciertas evidencias de que surgió en forma independiente tanto en África como en la India. El sorgo como cultivo doméstico llegó a Europa aproximadamente hacia el año 60 de nuestra era, pero nunca se extendió mucho en este continente. No se sabe cuándo se introdujo la planta por primera vez en América.

El cultivo del sorgo es muy versátil, ya que, de él se puede obtener azúcar, etanol, papel y otros compuestos químicos. El sorgo dulce (sorgo bicolor) es similar al grano sorgo con un tallo rico en azúcar, muy parecido al

de la caña de azúcar. Además, tiene amplia adaptabilidad, rápido crecimiento y alta acumulación de azúcar y producción potencial de biomasa.

El sorgo dulce es tolerante a la sequía, a las inundaciones, a la salinidad del suelo y a la toxicidad por acidez. El contenido de azúcar en el jugo extraído del sorgo dulce varía de 16 a 23%. Del material fermentable se obtienen principalmente tres azúcares: sucrosa (70%), glucosa (20%) y fructuosa (10%).

• *Yuca y jatrofa*

La yuca es una planta nativa del noreste de Brasil que fue diseminada por el resto de Latinoamérica, África y Asia, incluidos Filipinas y Taiwán, por españoles y portugueses. Es probable que lleve cultivándose más de 4 000 años y aún hoy continúa siendo la base de la alimentación de más de 800 millones de personas; de hecho, se trata del cuarto cultivo más importante en los países en vías de desarrollo y el séptimo en todo el mundo.

En África, este tubérculo, además de ser una fuente importante de energía y nutrientes para la población, también proporciona ingresos económicos a más de 300 millones de personas. Se trata de un arbusto euforbiáceo que puede alcanzar tres metros de altitud, con una raíz alargada (la cual puede llegar a medir hasta un metro de largo), la cual posee una cáscara externa leñosa y no comestible que protege de la oxidación con un interior blanco o amarillento, según la variedad.

Jatropha curcas (piñón de tempate), planta también euforbiácea originaria de México, es un arbusto cultivado en diferentes regiones del mundo. Desde hace algunos años comenzó el interés por establecer esta especie como cultivo comercial. Se le valora por sus propiedades medicinales e industriales y por el aceite contenido en sus semillas, el cual puede ser transformado en biodiésel.

Existe interés en el aceite de jatrofa como materia prima para la producción de biodiésel, ya que no es comestible. Por sus semillas, que tienen un alto contenido de aceite, el biodiésel producido con base en ellas posee propiedades similares a las del petróleo, aunque también se puede obtener etanol (una tonelada de cassava produce 280 litros de etanol del 96%).

• **Aceites**

Los aceites comestibles de soya, palma, canola, girasol, cártamo, coco y cacahuete se consideran insumos de primera generación por ser los primeros cultivos empleados en la producción del biodiésel. Actualmente la mayor cantidad del biodiésel se produce mediante aceites comestibles como la soya (Estados Unidos), la canola (Europa) y la palma (Malasia).

Las ventajas de los aceites comestibles son su composición pura (reduce su pretratamiento), su disponibilidad a gran escala, su comercialización internacional y la posibilidad de ser importados. Las desventajas incluyen su competencia con la producción de alimentos y las preocupaciones por la deforestación y los cambios de uso de suelo relacionados con el incremento de la producción de aceite vegetal.

En general, el porcentaje de aceite y el rendimiento por hectárea son parámetros importantes al considerar algún insumo como fuente de biodiésel. Asimismo lo es la extracción del aceite contenido en las semillas, que se puede realizar de manera mecánica, enzimática o con solvente.

Los aceites no comestibles representan una solución en la producción de biodiésel. Se consideran insumos sostenibles siempre y cuando se cultiven en páramos no aptos para cultivos alimenticios, eliminen la competencia por alimentos, reduzcan la deforestación y sean más eficientes, ambientalmente amigables y más económicos que los aceites comestibles.

Aunque existen varios cultivos de aceites no comestibles para producir biodiésel, algunos que destacan son la jatrofa, la higuera y la camelina. La jatrofa es una planta perenne que se puede cosechar casi continuamente (30-50 años), resiste sequías, crece rápido y se adapta a varias condiciones climáticas, mientras que la higuera es una planta tropical que tolera suelos variables y reduce la erosión de éstos.

En general, se afirma que ambos cultivos crecen con poca irrigación en suelos marginales de cualquier tipo, aunque también se ha encontrado que para producir altos rendimientos se requiere abastecer adecuadamente agua y nutrientes.

Las grasas animales, como cebo de res, grasa de aves, manteca de cerdo y grasas y aceites residuales de cocina se consideran insumos cuya disponibilidad no se ve afectada por políticas de uso de suelo, pues se producen gran-

des cantidades en las cocinas de todo el mundo y su pretratamiento sólo requiere deshidratación y filtrado, por lo que su conversión convencional es ideal para instalaciones pequeñas ubicadas en centros urbanos.

Sin embargo, la utilización de aceites residuales puede presentar problemas técnicos y de logística por su naturaleza residual, como su recolección, su control y su trazabilidad. Este insumo también puede requerir varios procesos para su acondicionamiento cuando tiene altos contenidos de material insaponificable, agua y ácidos grasos libres. Por lo cual los costos de producción de biodiésel de aceite residual pueden ser elevados.

El método más extendido para producir biodiésel a partir de grasas y aceites de origen natural es empleando la reacción de transesterificación, la cual consiste en hacer reaccionar las grasas y los aceites naturales con un alcohol. En el proceso se intercambia un grupo orgánico de la grasa por un grupo orgánico del alcohol, lo cual, a su vez, produce ésteres lineales de bajo peso molecular.

Estos nuevos ésteres presentan propiedades físicas muy similares a las del combustible diésel fósil. A nivel industrial el alcohol más utilizado para la transesterificación de los triglicéridos es el metanol, pero puede realizarse también con otros alcoholes lineales (etanol, propanol, butanol, etcétera) y obtener resultados similares.

Métodos para convertir la biomasa (46)

La conversión de la biomasa para producir energía se lleva a cabo mediante dos procesos principales: la conversión termoquímica y la conversión bioquímica. Mediante estos dos procesos la biomasa se utiliza para obtener tres tipos principales de productos: biocombustibles, calor y potencia para la generación de electricidad. Los procesos termoquímicos se pueden realizar haciendo una licuefacción a alta presión, o bien un proceso de pirólisis rápida.

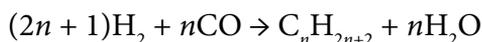
La pirólisis es uno de los procesos primarios en la producción de biocombustibles. En este proceso se aplica calor a la biomasa en ausencia de oxígeno para romper las largas cadenas de moléculas en sus respectivas cadenas más cortas. Generalmente la biomasa o los desperdicios son los que se emplean para producir el llamado gas de síntesis ($\text{CO} + \text{H}_2$) del cual se genera una gran variedad de productos, incluida gasolina.

La ventaja principal de lo anterior es que se convierten materiales sólidos en gas y en vapores que son muy fáciles de manejar, transportar y almacenar; su desventaja es que se requiere bastante calor para llevar a cabo las reacciones químicas que producen el gas de síntesis. Por su parte, la combustión involucra el quemado de biomasa en presencia de aire que posteriormente convierte la energía química en calor, potencia mecánica o electricidad.

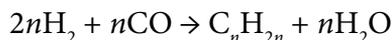
Su principal limitación es que el proceso de combustión genera altas emisiones de dióxido de carbono, material particulado y óxidos de nitrógeno. La gasificación es otro proceso termoquímico que emplea la biomasa para obtener productos de alto contenido energético lo que nuevamente incluye el gas de síntesis que esta vez produce metanol e hidrógeno, los cuales pueden emplearse como combustibles para el transporte.

Como ejemplo principal de la química del carbono, el proceso Fischer-Tropsch (FT) es una reacción importante tanto en la licuefacción de carbón como en la tecnología de gas a líquidos para producir hidrocarburos líquidos. La síntesis de FT es un proceso de polimerización catalítica que usa los hidrocarburos monoméricos formados por la reacción del CO con el H₂ para producir hidrocarburos de cadena corta y larga que tienen un amplio rango de aplicaciones. Los hidrocarburos que se forman son los siguientes:

- alcanos lineales:



- olefinas:



- alcoholes:



Las propiedades fisicoquímicas de los combustibles convencionales y los sintetizados con el proceso FT son comparables salvo, que los segundos no contienen sales, metales pesados, azufre o compuestos aromáticos. Esta tecnología es factible para el procesamiento de la biomasa, aunque actualmente su costo es más elevado que el del procesamiento convencional.

Los procesos bioquímicos (o biológicos) incluyen el empleo de bacterias para convertir la biomasa en productos gaseosos de muchas aplicaciones. Generalmente se emplean dos procesos: uno, la fermentación, y el otro, la

digestión en ausencia de oxígeno. La utilización de microorganismos en la elaboración de los alimentos se remonta a épocas prehistóricas, tan pronto como el hombre comenzó a cultivar sus granos y aprendió a triturarlos, mezclarlos con agua y cocerlos al fuego.

En ese entonces los microorganismos que participaban en esos procesos eran bacterias, levaduras y hongos que se encontraban naturalmente en los granos. Seis mil años antes, los sumerios elaboraban pan gracias a las levaduras presentes en los granos tritutados y en el agua; pero lo más interesante es el hecho de que la principal finalidad de mezclar granos con agua fue iniciar la fermentación de los granos para obtener una bebida, predecesora de la actual cerveza.

En el antiguo Egipto, la leche de cabra recién ordeñada contenía los microorganismos de la piel del animal, de las manos del ordeñador y del contenedor donde se la guardaba. Todos esos microorganismos se encontraron repentinamente rodeados de un medio desconocido que contenía lactosa, la cual comenzaron a utilizar eficientemente para producir leche coagulada.

Los residuos sólidos que quedan en el proceso de combustión se usan como alimento del ganado y como combustible para *boilers* o para hacer la gasificación. La digestión anaeróbica se lleva a cabo empleando materia prima microbiana en tanques bajo condiciones ideales durante varios días. El sólido residual se emplea como fertilizante, y los gases emitidos, como combustible.

Producción de la biomasa

Para diferentes regiones con limitaciones ambientales y de recursos, se dispone hoy en día de métodos útiles para la producción de la biomasa que eluden problemas como la deforestación, la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad o la escasez de agua y alimentos.

Los métodos para minimizar el uso de recursos incluyen: agricultura vertical; tecnología avanzada para disminuir el uso de agua, energía, tiempo, suelo, etc.; agricultura orgánica y biodinámica para mejorar la calidad

de los suelos y producir biomasa todo el año; agricultura en los techos de los edificios, y agricultura urbana en áreas disponibles y en casas.

La producción puede ser secuencial (una después de otra), múltiple (mucho al mismo tiempo) o flexible (una para muchas aplicaciones). Los métodos en ausencia de suelo incluyen la hidroponía para producir biomasa en un medio nutriente acuoso, en el cual se reutilizan los desperdicios empleando algas, microbios o bacterias. También, la aeropónica para minimizar el uso de nutrientes y agua, y la agricultura en el océano y en otros tipos de cosechas salinas para reducir la dependencia respecto del agua fresca.

Capítulo III

Una apología del carbono

En sus esfuerzos por mitigar los trastornos inducidos por el uso del carbono, los seres humanos lo han seleccionado como un estándar. El carbono provee “el rango de intercambio” de todos los gases de efecto invernadero, así como se emplea al oro como referencia. Sin embargo, a menudo se percibe que el problema principal que nos aqueja es el CO_2 y asuntos como la erosión, la deforestación, las vicisitudes de la agricultura, la composición química de los suelos, el aumento del nivel de los océanos y muchos otros problemas no se les pone la misma atención que al asunto del carbono.

Así, el dióxido de carbono, el arquetipo histórico de todos los gases, se convirtió en “dióxido de carbono equivalente” ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), ideado como un objeto de finanzas ambientales. Como todos los equivalentes, el carbono provee comensurabilidad. Permite la comparación cuantitativa entre varios gases y entre acciones heterogéneas humanas.

¿Cuánto carbono equivalente pesa su fiesta de cumpleaños? ¿Cuál es la huella de carbono de su dieta alimenticia? El carbono globaliza el ecosistema a escala planetaria. Ese sistema de equivalencias permite considerar que el ecosistema y la economía globales son dos estructuras de intercambio de carbono.

El carbono es un puente entre los procesos naturales y los seres humanos e inclusive permite calcular el presente y el futuro de las emisiones de gases de efecto invernadero o su reducción. Por ejemplo, sembrar árboles o reemplazar un generador de combustible por una turbina de gas compensa las emisiones globales de CO_2 .

Una cierta emisión de gases en una parte del mundo balancea una reducción equivalente en otra parte del mundo. La conmensuración alcanzada por el carbono equivalente convierte el mecanismo de compensación, que se compara con el sistema de indulgencias, esto es, el “mercado del perdón” que una vez se estableció en la Iglesia católica.

Una actividad que emite exceso de gases hoy se declara “carbono neutro” sobre la base de que el exceso será “neutralizado” cuando los árboles hayan madurado en el futuro. Esta presunta neutralidad depende no sólo de conjeturas acerca del futuro sino también de estimaciones contrafactuales del incremento de emisiones si el proyecto no se ha cumplido.

Frases entrecortadas como “neutralidad de carbono”, “industria de la descarbonización” o “planeta cero-carbono” hacen del carbono el “malo de la película”. El problema no es si hay mucho carbono (aunque desde luego hay mucho CO₂ en la atmósfera). También sirve para desconectar a la gente del futuro persuadiéndola de que puede haber cero-carbono y, en consecuencia, no haber deudas con las futuras generaciones, en lugar de considerar cómo las actividades humanas han trastocado el ciclo de carbono. El llamado “malo de la película” que hay que neutralizar o secuestrar debe ser rescatado por la vida. Después de todo el carbono es vida; no vida en su esencia, pero si vida en su diversidad, su profusión y su interdependencia.

Las generaciones de biocombustibles

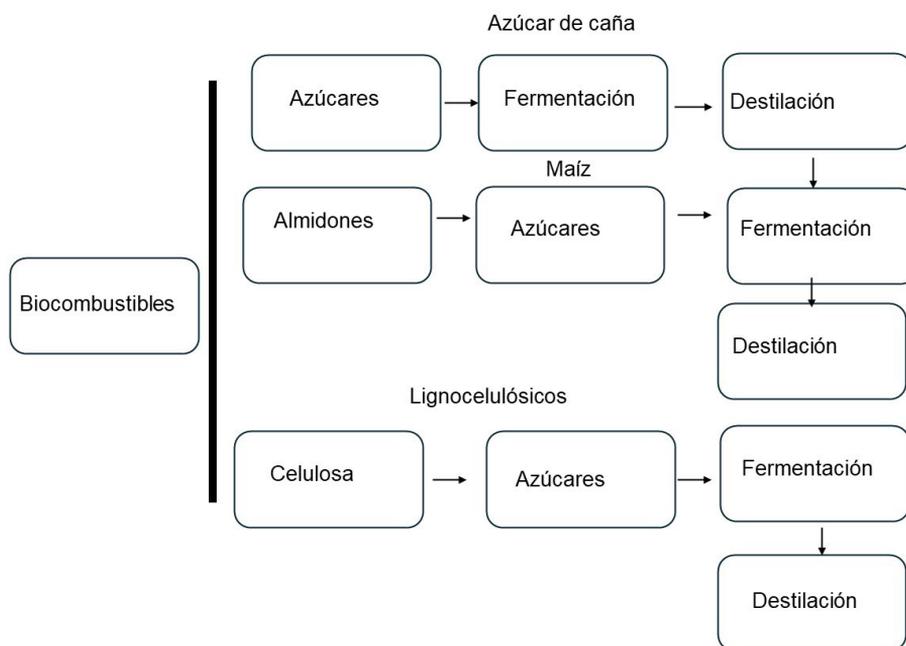
Los hongos han sido empleados en la fermentación de alimentos y bebidas desde la Era Neolítica. Los hongos son modelos experimentales muy importantes en la investigación microbiana y genética, así como en las principales capacidades que realizan en los procesos de producción por fermentación.

En los últimos 40 años, los avances en la biología molecular y en la ingeniería genética han hecho posible no sólo la selección genética de los organismos, sino también la modificación genética de algunos de ellos, sobre todo, los más simples. Los hongos no son capaces de ingerir su comida como lo hacen los animales, ni pueden manufacturar su propio alimento como lo hacen las plantas. En lugar de eso, se alimentan por absorción de nutrientes del medio ambiente que los rodea

Combustibles de primera generación

La primera generación de biocombustibles incluye al etanol y al biodiésel que están directamente relacionados con la biomasa que, en la mayoría de los casos, es comestible. El etanol se produce por fermentación de azúcares (principalmente glucosa), empleando un hongo genéticamente modificado como el *Saccharomyces cerevisiae* (cuadro 9).

Cuadro 9. Esquema de la transformación de la primera generación



Especialmente se emplea caña de azúcar o maíz para la producción de los biocombustibles de primera generación, aunque también se utilizan desperdicios de papa, remolacha, suero de leche y cebada. El proceso de producción es relativamente simple: la caña se muele para remover la sacarosa, la cual es purificada para producir ya sea azúcar o etanol.

El maíz es otra de las fuentes de carbohidratos para producir etanol, aunque, a diferencia de la caña, requiere una hidrólisis preliminar de la ha-

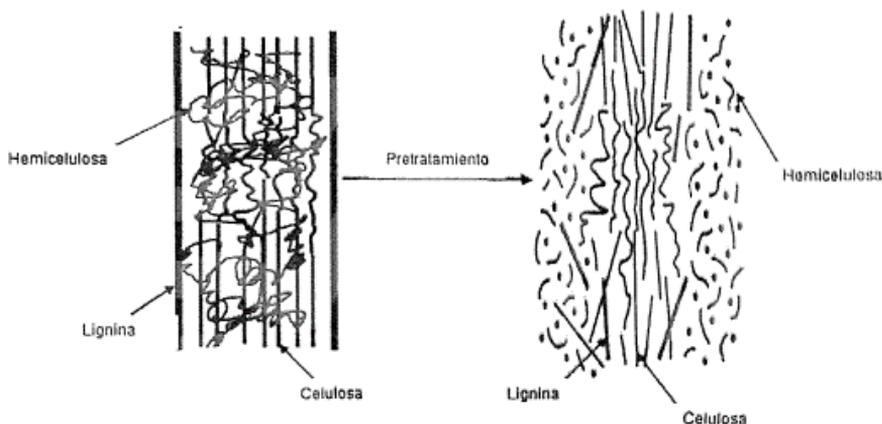
rina para liberar los azúcares que se van a fermentar, para lo cual se emplea una enzima. Los subproductos que se generan se utilizan en la alimentación del ganado. El interés por el uso de materiales lignocelulósicos como materia prima en procesos de transformación mediante microorganismos es importante desde hace varias décadas. Entre las razones fundamentales de los anterior se encuentran las siguientes:

- La materia lignocelulósica es el producto agroindustrial de mayor abundancia.
- Es una fuente de materia prima renovable, por constituir una parte estructural del reino vegetal.
- Los materiales lignocelulósicos son menos costosos que los materiales convencionalmente utilizados para producir etanol. Desde un punto de vista composicional, la pared celular de las células constitutivas de la biomasa lignocelulósica posee tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, con una pequeña cantidad de sólidos extractivos y cenizas.

La celulosa forma microfibras que funcionan como el esqueleto de la pared celular. El espacio interior está lleno de hemicelulosa y lignina, las cuales se encuentran conectadas con la celulosa a través de enlaces de hidrógeno, mientras que las conexiones entre hemicelulosa y lignina incluyen enlaces covalentes. Las fracciones más importantes para la obtención de etanol y otros productos químicos a partir de la biomasa lignocelulósica son las hemicelulosas (de 15 a 30% del peso seco del material) y la celulosa (de 35 a 50% del peso seco del material).

La lignina limita la eficiencia enzimática y la degradabilidad de la celulosa y la hemicelulosa, razón por la cual es necesario pretratar la biomasa para romper su estructura y liberar los polisacáridos. Existen diversos métodos de ruptura: físicos, químicos, fisicoquímicos o biológicos. Los métodos físicos incluyen el ultrasonido o la molienda, mientras que los métodos químicos involucran el uso de ácidos o álcalis. Los métodos fisicoquímicos incluyen la extracción con amoníaco y procesos hidrotérmicos como la ruptura por explosión con vapor. En los métodos biológicos se emplean hongos o enzimas que degradan la lignina (figura 11).

Figura 11. El pretratamiento de la celulosa



La biomasa lignocelulósica es menos costosa que los materiales convencionalmente utilizados para producir etanol. Entre los materiales lignocelulósicos más utilizados o estudiados para la obtención de etanol se hallan los residuales agrícolas y forestales. Entre los residuos agrícolas se encuentran los de la industria azucarera, siendo el bagazo de la caña de azúcar el material más utilizado y estudiado debido a que es un residuo abundante, renovable y de bajo costo.

El biodiésel es el otro combustible producido a escala industrial con materias primas de primera generación. Su proceso de producción es muy diferente al del etanol, ya que debe considerarse un proceso químico en su elaboración. Desde luego, usa biomasa en su preparación (plantas aceitosas y semillas), pero el proceso en sí extrae los aceites biodiésel rompiendo los enlaces que unen las largas cadenas de ácidos grasos que están unidas al glicerol, el cual es reemplazado por metanol en un proceso que se conoce como *transesterificación*.

Limitaciones de los combustibles de primera generación

Es probable que en ciertas regiones se cultiven materias primas vegetales para biocombustibles. Esto se debe a varias razones, la principal de las cua-

les es que algunos cultivos simplemente crecen mejor en algunos lugares que en otros. Al elegir una región para la producción de materias primas vegetales, se ha de tomar en cuenta lo siguiente:

- El uso del agua: cuanto menor sea la cantidad de agua utilizada para el cultivo, mejor, ya que éste es un recurso limitado. Esto es especialmente grave en los lugares más áridos.
- La invasión, es decir, la cosecha que mata las plantas locales y es difícil de controlar, puede poner en peligro la biodiversidad y dañar gravemente el ecosistema de una región.
- Los fertilizantes son los nutrientes que necesitan las plantas. Algunas plantas requieren menos recursos orgánicos que otras.
- El clima: en algunas zonas simplemente no es posible cultivar plantas para producir biocombustibles; por ejemplo, en zonas con climas fríos o áridos.
- Ausencia de seguridad alimentaria: el problema de los cultivos para combustible es que ocuparán tierras que podrían utilizarse para la producción de alimentos. En un mundo con una población en constante crecimiento, el problema de disponer de tierras para fines agrícolas cada vez es más grave.

Segunda generación de biocombustibles (47)

La segunda generación de biocombustibles se produce completamente de compuestos no comestibles, como cosechas de alta energía, plantas lignocelulósicas, residuos industriales, residuos forestales y otros productos de desecho.

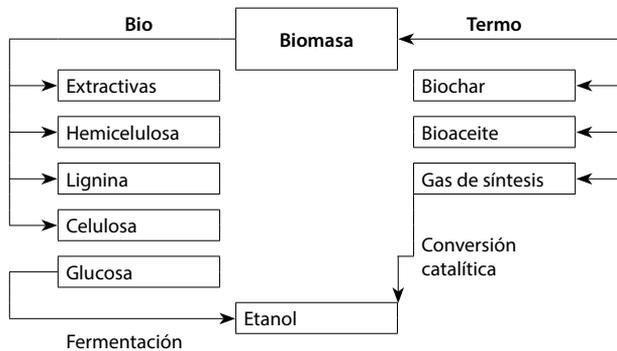
Comparadas con la producción de la primera generación, la segunda presenta métodos mejorados que se enfocan en incrementar tanto la recuperación del combustible como la producción de materias primas secundarias, lo que lo convierte en un método económicamente viable.

Los beneficios climáticos de la producción a gran escala de combustibles obtenidos de material lignocelulósico fueron cuestionados debido a su potencial competencia con el uso de la tierra que debía ser reforestada; se creía

que el cultivo propiciaba menor eficiencia en la captura del carbono que la reforestación, lo que provocaba una deuda que debía ser compensada por la negatividad del biocombustible resultante.

Análisis más recientes han mostrado que la producción de pasto varilla (*Panicum virgatum*) muestra que el potencial de mitigación de gases de efecto invernadero es comparable con el de la reforestación y tiene mucho mayor potencial de mitigación que la restauración del pasto (*Sorghum spp.*). Adicionalmente, la capacidad que tiene el sorgo de crecer en tierras marginales provee un camino a la producción de biocombustibles, ya que minimiza la competencia con las tierras cultivables.

Cuadro 10. Procesos empleados en la segunda generación



Los procesos de conversión usualmente implican dos aproximaciones diferentes, generalmente conocidas como “termo” o “bio” (cuadro 10). El proceso “termo” cubre procesos específicos en los que la biomasa es calentada con una mínima cantidad de un agente oxidante. Todos los procesos de esta categoría conllevan la conversión de la biomasa en tres fracciones: una sólida conocida como biochar, una líquida referida como aceite pirolítico o bioaceite, y gas de síntesis.

El biochar es carbón vegetal que se obtiene de restos vegetales y de residuos de biomasa. A diferencia del carbón vegetal clásico, empleado como combustible, el biochar no se utiliza como tal; no se quema, sino que se aplica al suelo para mejorar sus propiedades.

Si se emplean mayores temperaturas (550 a 750 °C) sin oxígeno el proceso pirolítico genera bioaceite. En cierta medida los procesos térmicos son

autosuficientes en sus necesidades energéticas porque la energía requerida para calentar la biomasa a la temperatura deseada es suplida por la oxidación parcial o total del carbono presente en la biomasa que libera energía.

En la mayoría de los casos los procesos “bio” aíslan la celulosa del resto de la biomasa lignocelulósica. El aislamiento de la celulosa constituye un reto tecnológico porque es necesario obtener un producto de muy alta pureza, ya que los subproductos consumen mucha energía y muchos químicos. Una vez separada, la celulosa se puede sacarificar mediante enzimas o por tratamiento con ácidos. Una vez aislada la macromolécula (por ejemplo, harina), se requiere una hidrólisis para fermentar con hongos.

La lignina es el segundo polímero natural más abundante y se encuentra entre 25 y 35% en peso en la biomasa lignocelulósica. La macromolécula es altamente energética y se emplea en los procesos de cogeneración o como combustible en la industria de la pulpa y el papel.

Los combustibles de segunda generación, de acuerdo con el análisis de ciclo de vida, muestran una diferencia positiva significativa en el balance de dióxido de carbono. Desde el punto de vista de la economía circular, la producción de combustibles sintéticos formados después de la pirólisis de plásticos de desecho y la conversión de gas de síntesis por el proceso Fischer-Tropsch al parecer es la más prometedora.

El combustible para aviación se obtiene mediante procesos de segunda generación. La biomasa —por ejemplo alga, jatrofa o camelina— se macera para extraer los aceites, los cuales son refinados para obtener el combustible de aviación de manera semejante a como se refina en una refinería convencional.

Tercera generación de biocombustibles (48)

Mientras que la primera y la segunda generación de biocombustibles emplean luz y dióxido de carbono para producir biomasa en cultivos que luego alimentarán los microbios, la tercera generación, o biocombustibles a partir de algas, combina la captura de energía y la producción de combustible en una simple célula de cianobacteria o de algas fotosintéticas.

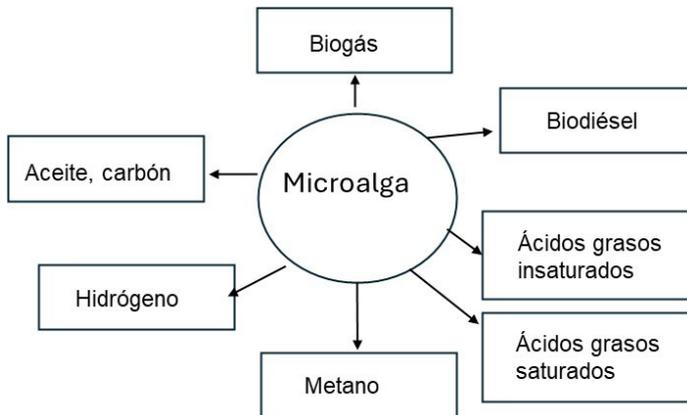
Las cianobacterias o algas verdeazules constituyen un grupo de organismos que poseen características propias de las bacterias, así como de las

algas y las plantas eucariotas. La mayoría de los representantes del grupo es de vida libre y se encuentra principalmente en ambientes acuáticos continentales y marinos, aunque también en terrestres.

El grupo se reconoce por su habilidad para establecerse en ambientes extremos, habitando sistemas hipersalinos, aguas termales (hasta 80 °C) e incluso regiones polares a varios grados bajo cero. Tiene la habilidad de sobrevivir a largos periodos de desecación y algunas especies producen una vaina pigmentaria externa que les permite sobrevivir en ambientes de alta radiación UV.

Las cianobacterias participan en la formación de estromatolitos (fósiles y actuales) y son los únicos organismos fotoautotróficos que presentan mecanismos y adaptaciones para la fijación de nitrógeno atmosférico (cuadro 11).

Cuadro 11. *Productos obtenidos con la tercera generación*



Algunas especies son consideradas beneficiosas para el hombre por sus diversas aplicaciones biotecnológicas, mientras que otras son conocidas por sus aspectos perjudiciales, dada su capacidad para sintetizar y liberar cianotoxinas o por alterar las características organolépticas del agua. En ciertas ocasiones las poblaciones de cianobacterias crecen masivamente.

Cuando esos fenómenos son protagonizados por una o pocas especies, el suceso recibe el nombre de "floración algal", el cual trae aparejado una serie de impactos ambientales que, además, constituyen, un alto riesgo para el hombre.

El cultivo de cianobacterias para la producción de biocombustibles es una alternativa ventajosa ya que aquéllas poseen un elevado contenido de lípidos y presentan una alta tasa de crecimiento. Al realizarse toda la producción en un solo organismo, al proceso es más directo y eficiente y no es necesario invertir energía para separar raíces, hojas y tallos.

Las algas crecen en un amplio rango de hábitats acuáticos, incluyendo lagos, ríos, océanos y hasta aguas de desecho. Pueden tolerar un amplio rango de temperaturas, salinidades y pH y diferentes intensidades de luz, y crecer solas o en simbiosis con otros organismos.

La conversión de la energía solar en las cianobacterias y en algas es mucho mayor que en las plantas, alcanzando una eficiencia de 3% en las microalgas comparada con menos de 1% en la mayoría de los cultivos. Más aun, muchas de estas especies pueden crecer en aguas de desecho o en ambientes marinos con requerimientos nutricionales simples; por eso no compiten con la tierra empleada en la agricultura.

Una vez pretratadas las moléculas de azúcares y aromáticos se pueden extraer de la biomasa lignocelulósica en conjunto con carbohidratos y lípidos y emplearse como fuente de carbono para la producción microbiana y la generación de más combustibles y biogás. A pesar de las comparaciones favorables, el cultivo de bacterias y algas para esta tercera generación tiene altos costos de producción.

Contrariamente a la agricultura, la cual ha sido optimizada por los seres humanos desde hace miles de años, la tecnología a gran escala de cultivo de microorganismos fotosintéticos todavía está en sus etapas de desarrollo. El cultivo se puede hacer en sistemas abiertos, como en un estanque, o bien, en sistemas cerrados, como un fotobiorreactor.

El primero tiene menores costos de operación, pero su uso es limitado debido al riesgo de contaminación y a las estrictas regulaciones que existen sobre los microorganismos modificados. Las algas, especialmente las microalgas, han sido usadas como alimento desde tiempos prehistóricos y todavía en la actualidad juegan un papel prominente en las tradiciones culinarias de muchos países, especialmente de Asia y, en menor medida, en Latinoamérica.

La cultura maya vivía en un balance precario en medio de la selva, cuyas condiciones no eran adecuadas para la agricultura. El desarrollo de las gran-

jas de microalgas en la época maya explica cómo una población de dos millones de habitantes se logró sostener hacia el final del periodo Clásico (900 a.C.) a pesar de las condiciones adversas de la agricultura.

Además, usaban microalgas en algunos alimentos, como panes o sopas, como parte de su dieta diaria. Por su parte, la dieta de los aztecas, de quienes se tiene la mayoría de los registros acerca de los usos y costumbres de la “espirulina” (*Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*), era completa y balanceada, tanto cuantitativa como cualitativamente, gracias a ciertos alimentos especiales como el llamado *tecuítlatl*.

El *tecuítlatl* —hoy conocido como “espirulina”— era un alimento agradable al paladar de los nativos del centro de México, que gustaba a la mayoría de los españoles que lo consumieron.

El primer registro de la historia que se tiene acerca del consumo de espirulina como alimento para seres humanos proviene de Bernal Díaz del Castillo, uno de los acompañantes de las tropas de Hernán Cortés, quien reportó en 1521 que la espirulina era cosechada de las aguas del lago de Texcoco, a la que secaban y vendían en el mercado de Tenochtitlán.

Cuarta generación (49)

La dependencia del petróleo en el mundo es un reto que potencialmente puede paliarse por la producción agrícola de biocombustibles, al disminuir el contenido de carbono. Y aunque las plantas para producirlos no han sido domesticadas para la producción moderna, la forma más rápida y eficiente de obtener biocombustibles es por medio de la biotecnología.

El primer estudio científico de microalgas se inició a finales del siglo XIX, gracias a Martinus Beijerinck (1851-1931), botánico y fitopatólogo, considerado uno de los pioneros de la microbiología por sus estudios sobre la naturaleza de los virus.

En la década de 1880, al mismo tiempo que comenzó a investigar sobre organismos que tuvieran desarrolladas características químicas especiales, como fijadoras de nitrógeno o quimioautótrofas, demostró que el enriquecimiento con una determinada composición química favorecía el desarrollo de esas características.

Este logro permitió que se desarrollara investigación en torno del uso de microalgas; por ejemplo, la realizada en torno de la fotosíntesis. Varios años después, Melvin Calvin y su grupo en la Universidad de Berkeley identificaron el ciclo de la asimilación fotosintética del dióxido de carbono, ahora conocido como Ciclo de Calvin, que lo hizo merecedor del Premio Nobel de Química en 1961.

Las reacciones que componen este ciclo pertenecen a la llamada *fase oscura del proceso fotosintético*, o *fase independiente de la luz*, durante la cual se fija el CO_2 tomado de la atmósfera, incorporándolo al organismo en forma de glucosa.

La investigación acerca de la producción de lípidos a partir de microalgas como reactivo para obtener biocombustibles se inició en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial.

Las materias primas de cuarta generación que emplean la luz solar son ampliamente disponibles, económicamente baratas e inacabables. La modificación genética de la biomasa de las microalgas tiene grandes aplicaciones en la extracción de sus aceites, pues induce la autólisis de la célula y del sistema de secreción de productos.

Debido a la facilidad y a la simplicidad de la fermentación, los microorganismos son considerados una fuente ideal para la generación de biocombustibles a través de varios procesos metabólicos como el catabolismo de los azúcares o el metabolismo de los ácidos grasos.

Sin embargo, los procesos de fermentación con microbios naturales dan poca cantidad de diferentes productos, algunos no deseables, razón por la cual se cuestiona la factibilidad de producir a escala industrial.

Con el desarrollo de la tecnología de ingeniería genética hoy es posible modificar un grupo de microbios para utilizar sustratos alternativos hidrolizando el complejo en formas simples fermentables.

Con la capacidad de introducir rápida y específicamente modificaciones en el genoma se ha revolucionado la ingeniería genética que tiene un alto impacto en las biorrefinerías que operan en el mundo.

Mediante estas técnicas tan precisas se facilita la manipulación de varios procesos de la producción de biocombustibles, que incluyen la hidrólisis de la biomasa a moléculas menos complejas, impidiendo la proliferación de procesos que compitan, y mejorando la tolerancia a los solventes y a los sustra-

tos, lo cual tiene un profundo impacto en las aplicaciones comerciales futuras. Respecto de a los tipos de biomasa empleada, se pueden generar biocombustibles sólidos que consisten en una biomasa no fósil, orgánica o de origen biológico.

La terapia y la ingeniería genéticas son dos tecnologías relacionadas entre sí que involucran la alteración del material genético de los organismos. La distinción entre las dos tecnologías se basa en el propósito de cada una. La terapia genética busca alterar los genes para corregir defectos y, por lo tanto, prevenir o curar enfermedades genéticas.

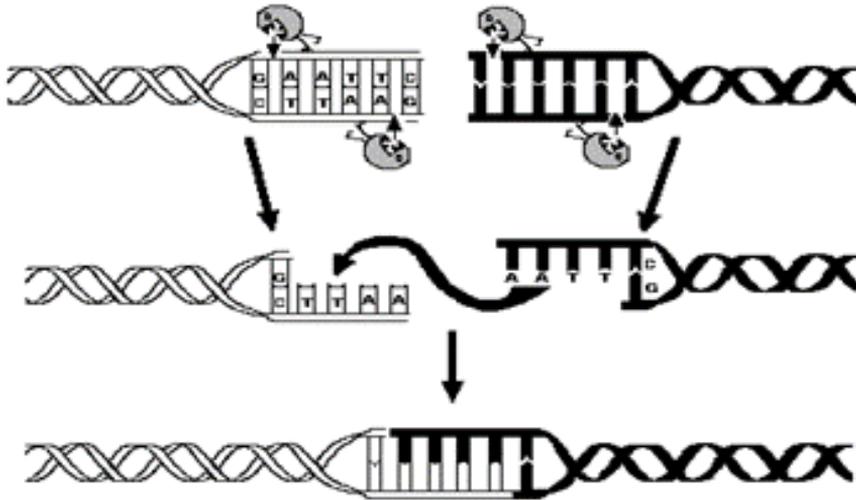
La ingeniería genética provee formas de cambiar los genes, esto es el conjunto de instrucciones contenidas en las células de las criaturas vivas. Existe un gran traslape entre la “tecnología genética” y el nuevo término “biología sintética”. Tradicionalmente la biotecnología se ha practicado por siglos. Se ha empleado para crear nuevos cultivos y distintas variedades de ganado y mascotas.

La tecnología genética es una rama moderna de la biotecnología que permite la modificación directa o la remoción de un gen, o bien, la transferencia de un gen de una especie a otra. Cuando las plantas, los animales y otros organismos se modifican usando la tecnología genética, se le conoce como organismos genéticamente modificados (OGM). Si la modificación incluye la introducción de un gen a otro organismo, se conoce como transgénesis.

La tecnología de recombinación del ADN es una técnica que se emplea para producir un ADN artificial por medio de la combinación de diferentes materiales genéticos provenientes de varias fuentes. Con el descubrimiento de las enzimas restrictivas, también conocidas como tijeras moleculares, se pudo desarrollar la tecnología de recombinación.

El proceso se implementa con la ayuda de herramientas de la biotecnología, como las ya mencionadas enzimas restrictivas que cortan el ADN en lugares específicos e insertan un gen con la ayuda de una molécula de plasmidio que es un ADN situado fuera del cromosoma y que se puede replicar independientemente (figura 12).

Figura 12. Mecanismo de recombinación



El escepticismo que prevalece sobre los cultivos empleando OGM ha conducido a regulaciones muy estrictas, lo que hace difícil para los científicos realizar pruebas de campo con estos materiales. Otra interesante vía de modificación consiste en reducir la fotorrespiración de la planta para impedir que sintetice compuestos de carbono.

Cuando las plantas toman el dióxido de carbono y fijan la molécula durante la fotosíntesis, ese carbono puede terminar en muchos lugares; por ejemplo, en un azúcar, la celulosa, la lignina, las proteínas o los lípidos. Uno de los principales componentes de los que proponen la conversión a biocombustibles es un grupo de lípidos llamados TAG (triacilgliceroles), que son ácidos grasos unidos al glicerol mediante enlaces éster donde se almacena la energía. Pues bien, se puede convertir los TAG en biodiésel vía la transesterificación, o en gas avión, por hidrotreatmento.

Tejidos vegetativos de plantas

Sumados a la ingeniería de producción de cosechas que generan aceites, actualmente existe grandes esfuerzos de investigación para desarrollar nuevas fuentes de aceites como los tejidos vegetativos de plantas y microalgas,

con el fin de aumentar la producción y asegurar el suministro de aceites vegetales.

El tejido vegetativo (las hojas y los tallos) constituye la mayor parte de la biomasa de las plantas y representa una nueva plataforma para la producción de aceites que ulteriormente pueden transformarse en biocombustibles.

En la última década, muchas investigaciones se han concentrado en la ingeniería metabólica del tejido vegetativo para incrementar la producción de aceite. A diferencia de las semillas de la mayoría de las plantas, las hojas contienen bajos niveles de TAG aproximadamente 0.5% en peso.

Recientemente, la modificación metabólica ha sido reprogramada para incrementar el nivel de TAG en las hojas en caña de azúcar y sorgo, particularmente para la producción ulterior de biodiésel.

Los genes

El código que regula todos los procesos biológicos está contenido en el ADN presente en todas las células de los organismos vivos.

Sólo una pequeña parte del ADN de una célula está constituida por genes, los cuales contienen la información codificada. Las células utilizan esta información para producir proteínas, las herramientas y los componentes básicos necesarios para que funcionen los procesos biológicos.

Aún no se conoce claramente cuál es el papel de la parte restante del ADN de las células, que generalmente está organizado en pares de cromosomas correspondientes, donde se hereda un juego de cromosomas de cada progenitor. El conjunto completo de cromosomas de un organismo y, por lo tanto, el conjunto completo de información genética, se conoce como genoma.

El Proyecto de Secuenciación del Genoma Humano ha descodificado la información genética contenida en las células humanas. En el proyecto se han desarrollado diversas tecnologías y métodos que se pueden aplicar a todos los organismos vivos. Otros importantes proyectos de secuenciación del genoma se basan en la colaboración internacional para estudiar algunos cultivos, como el arroz, que se consideran representativos de sus grupos biológicos.

¿Qué podemos aprender del estudio de la estructura genética de una especie?

Los avances más importantes en la biotecnología agrícola se han realizado en el ámbito de las investigaciones sobre los mecanismos genéticos en que se basan diversas características de importancia económica y de la genómica.

La genómica es el estudio de la estructura completa del genoma. Proporciona información sobre la estructura de los genes y, por lo tanto, es una base para entender las estructuras de las proteínas. Por lo tanto, con una lista de sus genes se puede crear el modelo teórico de la biología de un organismo.

Comparar la posición relativa de genes en los cromosomas y en las secuencias de ADN en diferentes organismos reducirá de forma significativa el tiempo necesario para identificar y seleccionar genes potencialmente útiles. Para la mayoría de los tipos de cultivos, ganado y enfermedades, se han estudiado algunas especies como modelo, ya que se pueden usar para entender organismos relacionados.

Se están acumulando de forma rápida conocimientos sobre el genoma de las especies modelo. Diferentes especies de plantas suelen tener una estructura de genoma muy parecida en cuanto al contenido genético y al orden de los genes en los cromosomas.

Esto significa que la posición que ocupa un gen —que define características particulares— puede ser fácilmente determinado comparando un genoma con otro. Por lo tanto, no es necesaria para nuestra comprensión la secuenciación completa de los genomas de todas las plantas de cultivo, con todos los gastos que eso implicaría.

Como consecuencia de la similitud, el conocimiento de un cultivo específico en términos de bioquímica, fisiología y genes, ahora puede transferirse a otros cultivos. Esto es especialmente importante en el caso de los cultivos que carecen de interés comercial y que son usados en la agricultura de subsistencia en muchas partes del mundo. Estos cultivos no han atraído las mismas inversiones en investigación que se han destinado al trigo, el arroz y el maíz en el siglo pasado.

Biología sintética

Incrementar los rendimientos de las cosechas se puede llevar a cabo: *i)* manteniendo o mejorando la productividad actual de los cultivos para impedir una mayor deforestación y *ii)* reduciendo el aporte de agua y nutrientes. Para llevar a cabo lo anterior, se necesita una nueva versión de la Revolución Verde mediante la cual en las nuevas cosechas se aplique una ingeniería de precisión para optimizar los rendimientos y las interacciones medioambientales.

Las plantas no se consideran aisladas, sino, por ejemplo, en combinación con sus microbiota y el suelo. La biología sintética trata de hacer la biología más accesible a los ingenieros, pensada como una serie de herramientas que usan la abstracción, la estandarización y la construcción automatizada para cambiar la manera en que construimos los sistemas biológicos y extendemos el rango de nuevos productos.

Figura 13. *Diseño del concepto de biología sintética*



El concepto de la ingeniería del ciclo diseño-construcción-prueba-aprendizaje puede mejorar la aplicación de la biología sintética a la ingenie-

ría de organismos, ya que nos alienta a aprender explícitamente de los experimentos e integrar ese conocimiento en el diseño experimental mostrado en la figura 13.

En la fase de diseño se describe el problema, se selecciona la ruta y las partes seleccionadas; dichas partes son sintetizadas, ensambladas y transformadas en el organismo huésped que se ha escogido. Durante la fase de prueba se analiza el organismo modificado y se recolectan los datos. En la fase de aprendizaje se analizan los datos de la fase de prueba y se emplean para informar la nueva fase de diseño.

¿En qué se diferencia la biología sintética de la ingeniería genética convencional? Mientras que la ingeniería genética puede manipular la expresión de un solo gen, la sintética va más allá, por ejemplo, introduciendo una ruta metabólica completa bajo estrictas medidas de regulación. Si bien es importante diseñar y sintetizar partes del ADN, también lo es incorporar sistemas de datos y modelar matemáticamente los experimentos subsiguientes.

La meta ulterior es contar con descripciones biológicas para que podamos entender y modificar un organismo, de igual manera que lo hace un ingeniero con un automóvil. Hay que adelantar que, en el caso de las plantas, dichas metas aún son distantes; sin embargo, el progreso en este campo no se detiene.

Modificando la pared celular

El potencial de la biotecnología para modificar la estructura de la pared celular o la composición lignocelulósica de la planta puede generar mejoras considerables en la producción de etanol por hectárea o garantizar el balance energético y económico de la producción del alcohol celulósico.

La principal limitación para convertir la biomasa de las plantas es la falta de una enzima capaz de romper la pared celular. La referida estructura es una parte vital, ya que provee fuerza mecánica, protege la planta de estrés abiótico y biótico y lleva a cabo otras funciones esenciales de las plantas.

Por lo tanto, es necesario entender la estructura de la pared a nivel químico, bioquímico y biológico con el fin de desarrollar plantas que sean capaces

de mantener esencialmente sus funciones, pero que permitan la desconstrucción eficiente y su conversión a biocombustibles.

El reticulado extenso de las paredes celulares por la lignina es una de las limitaciones primordiales para producir biocombustibles por este medio, ya que impide la accesibilidad de enzimas hidrolíticas, por lo que es necesario llevar a cabo pretratamientos físicos o químicos para permitir la hidrólisis a azúcares simples.

Degradación de plásticos y conversión en combustibles

Los plásticos tienen alta resistencia a muchos factores físicos y químicos; y por eso su degradación en la naturaleza es extremadamente lenta. Unos cuantos microbios han mostrado gran potencial hacia la degradación y la eventual conversión de los plásticos.

Por ejemplo, el tereftalato de polietileno (PET) puede ser degradado por dos enzimas que generan dos monómeros, ácido tereftálico y etilenglicol. A pesar de la falta de estudios de enzimas capaces de despolimerizar, el poliestireno, el polietileno y el polipropileno pueden ser tratados empleando la pirólisis.

Los hidrocarburos de larga cadena resultantes pueden ser metabolizados por microbios. La degradación parcial o total de los plásticos puede llevarse a cabo introduciendo un microorganismo en un huésped que no sólo rompa los enlaces poliméricos sino que también convierta los productos degradados en combustibles.

El estrés y las algas

En el caso de la producción comercial de biodiésel con aceites producidos por las algas a partir de la biomasa, es necesario que esas algas crezcan rápidamente generando una alta productividad de lípidos, ya que si se crecen en gran cantidad generalmente el contenido de lípidos es relativamente pequeño.

Se sabe, por otra parte, que cuando las algas crecen lentamente, la cantidad de lípidos es alta. Una manera de aumentar la cantidad de lípidos producida es sometiendo el organismo a una gama de estrés ambiental, mediante acciones como elevar la temperatura y disminuir la cantidad de nutrientes, introducir contenido de dióxido de carbono o mediante otros factores externos adversos para su entorno.

Consecuentemente, las células responden alterando su programa metabólico para adaptarse al ambiente modificado. Por ejemplo, se conocen algas que aumentan su producción de lípidos si se incrementa la concentración del hierro en el medio; por su parte, una deficiencia inducida de nitrógeno también provoca un aumento en la producción de lípidos compuestos de series de ácidos grasos de cadena larga, los cuales son similares a los aceites vegetales útiles en la producción del biodiésel.

Se han empleado ciertos parámetros bioquímicos para medir el estrés de las algas, y, tras examinar sus resultados, se ha descubierto una relación directa entre la cantidad de irradiación y la actividad antioxidante. El aumento de la irradiación incrementa la actividad fotosintética del alga, como sucede en cualquier planta, pero, a partir de ciertos niveles, se ha podido comprobar que la actividad antioxidante disminuye.

¿Qué son los marcadores moleculares y cómo se utilizan?

Los marcadores moleculares son fragmentos específicos del ADN que pueden ser identificados dentro del genoma. Se encuentran en lugares bien definidos del genoma. Se usan para “marcar” la posición de un gen específico o la herencia de una característica particular. En un cruzamiento genético, las características de interés normalmente seguirán vinculadas a los marcadores moleculares.

Por lo tanto, se puede seleccionar a los individuos en los que esté presente el marcador molecular, ya que éste indica la presencia de la característica deseada. Los marcadores moleculares se pueden usar para seleccionar plantas o animales que lleven genes que afecten rasgos económicamente importantes como el rendimiento de la fruta, la calidad de la madera, la

resistencia a enfermedades, la producción de leche y carne o la grasa corporal.

La medición de estas características por medio de métodos convencionales es mucho más difícil, requiere más tiempo y es más cara, ya que hay que esperar a que el organismo alcance la madurez. Los marcadores moleculares se han usado para seleccionar plantas con el objetivo de crear variedades de mijo perla resistentes al mildiú.

El mijo perla es un cereal cultivado como alimento y como paja en las zonas más calurosas y áridas de África y Asia. Los marcadores moleculares son útiles para medir el alcance de la variación a nivel genético, dentro de las poblaciones y entre ellas.

Esto puede guiar las actividades de conservación genética para cultivos y ganado, así como la gestión de los bosques y de la pesca. Por ejemplo, las encuestas mundiales indican que alrededor de 40% de las variedades de animales de ganado está en peligro de extinción.

La mayoría de estas variedades están presentes sólo en los países en vías de desarrollo y con frecuencia se sabe poco de ellas o de la capacidad de mejorarlas. Pueden contener genes valiosos que confieran características benéficas, como la resistencia a enfermedades, que pueden ser útiles para generaciones futuras. Las biotecnologías modernas pueden ayudar a contrarrestar las tendencias de pérdida de diversidad genética en los sectores alimenticio y agrícola.

Los marcadores moleculares han sido ampliamente utilizados para identificar la composición genética de organismos y para obtener su “huella digital genética”. Este conocimiento puede ser muy importante para la gestión de bosques, para la conservación de especies en peligro de extinción y para criar y rastrear ganado.

La ingeniería en plantas

La domesticación de las plantas por selección artificial es básica en la historia de la humanidad. Comenzó escogiendo las semillas de plantas con ciertas características deseables y empleándolas en subsiguientes cosechas, como lo evidencia el trabajo de Gregor Mendel y sus leyes sobre la herencia.

La identificación de los cultivos de trigo con baja estatura que los hacía menos susceptibles de doblarse por la acción del viento condujo a lo que hoy se llama la “Revolución Verde”.

El agrónomo Norman Borlaug recibió el Premio Nobel de la Paz en 1970 por usar esas técnicas y por incrementar 60% los rendimientos de trigo en India y Pakistán. Los progresos en el campo de la genética en la primera mitad del siglo xx sugerían que se podían incrementar aún más los rendimientos. La mutagénesis (empleando rayos V, radiación y mutación química) fue rutinariamente empleada para producir nuevas variedades de plantas.

La aparición de los métodos transgénicos en la década de 1980 fue un cambio sustancial. Se conoce como transgénesis al proceso de transferir genes de un organismo a otro. La transgénesis se usa actualmente para hacer plantas y animales modificados. Transgénico se refiere a una planta o a un animal en cuyas células se ha introducido un fragmento de ADN exógeno, o sea, un ADN que normalmente no se encuentra en ese organismo.

Existen distintos métodos de transgénesis, como la utilización de pistolas de genes o el uso de patógenos como vectores para transferir los genes. Permite la introducción de nuevos rasgos que no existían; por ejemplo, la resistencia de la planta a una enfermedad específica. Las técnicas transgénicas tienen sus limitaciones, entre las cuales destaca la dificultad de controlar en qué parte del genoma se integra, que puede conducir a variaciones en la expresión de los genes e inestabilidad.

Adicionalmente existe mucha preocupación del público respecto de los peligros de los organismos genéticamente modificados. El desarrollo de tecnologías de edición precisa que altere la secuencia de ADN, pero también el nivel de expresión del gen, modificado, han sido fundamentales en los recientes progresos de esta ciencia, ya que no se requiere introducir un ADN foráneo a la célula, sino sólo enzimas que rompen la hélice del ADN, el cual es reparado por métodos que posee la planta, la cual es modificada y adquiere propiedades nuevas, como una mayor resistencia.

Un ejemplo que nos interesa es el relacionado con la producción de biocombustibles. Como hemos revisado antes, la forma más barata y simple de producir biocombustibles consiste en convertir el maíz o la caña de azúcar en etanol, empleando hongos fermentadores. Sin embargo, esto tiene consecuencias en los precios de los alimentos y en el uso de terreno; además, el

trigo requiere grandes cantidades de agua y fertilizante para obtener buenos rendimientos.

Los residuos lignocelulósicos de la agricultura, como el rastrojo de maíz, no son suficiente para desplazar significativamente a los combustibles fósiles. Por lo anterior, el pasto varilla, el álamo y la biomasa del sorgo se han sugerido como alternativas, aunque existen barreras para su implementación, ya que la mayoría de ellas no han sido domesticadas.

La investigación en el campo ha sido exitosa en el desarrollo de plantas de bajo contenido de lignina, aunque si la disminución es muy grande, la planta muestra defectos en su crecimiento, por lo que el enfoque es reducir el contenido de lignina en las plantas en las que no es esencial

¿Qué es la bioeconomía?

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la bioeconomía es “la producción, utilización y conservación de los recursos biológicos, incluidos los conocimientos relacionados, la ciencia, la tecnología y la innovación, para proporcionar información, productos, procesos y servicios a todos los sectores económicos con el objetivo de avanzar hacia una economía sostenible”.

El término “bioeconomía” significa una economía derivada de la producción de recursos biológicos renovables y la conversión de estos recursos y de los flujos de residuos en productos con valor añadido, como piensos, bioproductos o bioenergía.

La bioeconomía se ha convertido en un concepto clave para marcar las prioridades de un desarrollo sostenible y surge en respuesta a los diferentes retos a los que la sociedad actual debe hacer frente, como la garantía de suministro y reparto justo de los alimentos, la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción de la utilización de combustibles fósiles. En ese entorno, la ciencia, la investigación y la innovación son imprescindibles para marcar la dirección hacia un uso más eficiente de los recursos.

La bioeconomía es un término que retoma Nicholas Georgescu-Roegen en 1975 para referirse al carácter biológico y económico de la humanidad. Para el economista de origen rumano, los procesos económicos, como ya se

apuntó, van más allá de la determinación de precios vía oferta y demanda o de establecer los márgenes de ganancia empresarial.

Por ser un subsistema, está sujeto a las leyes que rigen la naturaleza. La termodinámica, disciplina encargada de analizar las propiedades energéticas, establece tres leyes fundamentales.

Según Roegen, el ciclo productivo está fuertemente influido por la tercera ley: la entropía. Para este mismo autor, el desarrollo de la civilización humana se debe al avance tecnológico que permitió el dominio energético sobre cierta fuente material —la madera, el carbón, el petróleo y el gas natural—. En efecto, la aparición de tecnologías disruptivas, como la máquina de vapor, permitió a las sociedades expandir sus niveles de consumo y extracción material como nunca lograron hacer sus predecesoras.

La proliferación de estas tecnologías creó una red de mercancías, servicios, sectores y necesidades sociales que dependen sustancialmente de energías fósiles y cuya dependencia hace difícil sustituir.

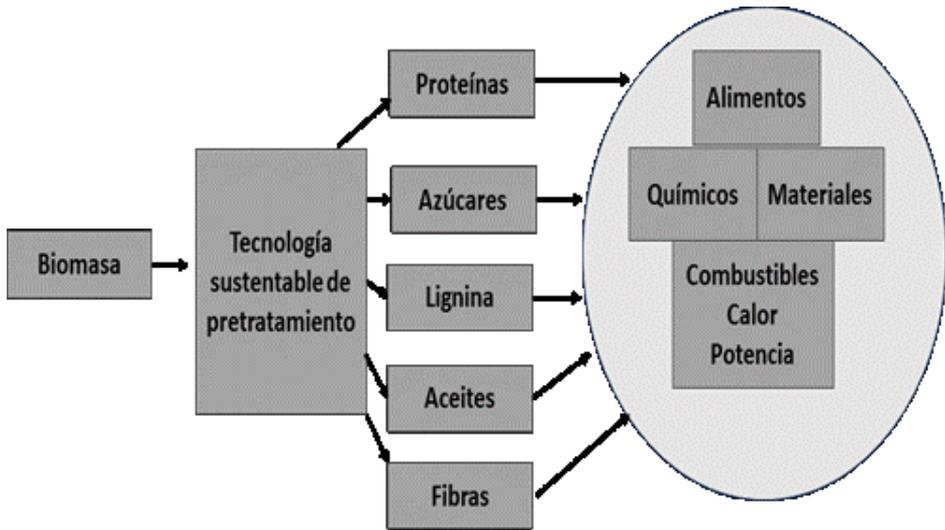
El tamaño de la sociedad, su intensa dinámica, la perspectiva de crecimiento poblacional y los patrones de consumo nos han orillado a una crisis entrópica que, por un lado, presiona la reproducción de los procesos productivos a los cuales está acostumbrada la humanidad y, por otro, nos acerca a un abismo del cual no hay retorno, que es el cambio climático.

Roegen, reconociendo el carácter entrópico de la economía, estableció una agenda mínima bioeconómica que cuestiona la visión convencional de crecimiento y desarrollo. Su objetivo principal es reducir la intensidad energética de la producción y el consumo a partir de transformaciones severas del comportamiento económico.

Biorrefinerías

El fenómeno de la bioeconomía comprende la conversión sustentable y la producción de biomasa para energía, salud y productos industriales. Un componente vital de la bioeconomía es el concepto de biorrefinerías, que tiene el potencial de reemplazar a las refinerías convencionales de petróleo. Los dos tipos son comparables, salvo que la biorrefinería emplea la biomasa de segunda generación como fuente de producción (cuadro 12).

Cuadro 12. Esquema de proceso de una biorrefinería



La producción continua y el aporte de biomasa son necesarios para mantener las biorrefinerías. Por ejemplo, la agricultura es indispensable para la supervivencia humana; por lo tanto, cada vez es más evidente que las prácticas agrícolas deben transformarse para tomar ventaja de las técnicas que usan todos los recursos tan eficientemente como sea posible y eliminar la noción de residuos. La biorrefinería integra procesos de conversión de la biomasa para producir combustibles, potencia y productos químicos.

Esta aproximación integra sistemáticamente la extracción de compuestos de alto valor, la digestión anaeróbica y el uso de los subproductos agrícolas para mejorar los suelos y simultáneamente optimiza costos y uso de recursos protege el medio ambiente. La extracción de los compuestos valiosos puede ser costosa para la refinería, si hay gran consumo de energía, aunque la recuperación de los residuos puede equilibrar el balance económico.

Cuando se emplean soluciones de economía cíclica en lo referente a los requerimientos energéticos, entra en juego un segundo elemento del sistema: los digestores anaeróbicos, que generan metano de los residuos orgánicos y, por lo tanto, se recupera energía y se reduce la contaminación. Se han propuesto como reactivos en el digestor la biomasa lignocelulósica y los subproductos de vegetales y frutas.

Finalmente, la aplicación del residuo húmedo producido durante el proceso de digestión anaeróbica puede devolverse a los suelos agrícolas, cerrando el ciclo; sin embargo, la aplicación directa a veces no es segura ya que puede diseminar patógenos en el lugar donde se aplique. El compostaje es un proceso importante que biológicamente estabiliza la materia orgánica que recupera nutrientes y minimiza los riesgos de contaminación. Según su grado de integración, las biorrefinerías que existen son las siguientes:

- *Biorrefinerías de fase I.* Son aquellas que no poseen grado de integración alguno. Se parte de una única materia prima, y a través de una única transformación se produce un solo producto.
- *Biorrefinerías de fase II.* Son aquellas que a partir de una única materia prima son capaces de producir más de un producto, gracias a una pequeña integración de un limitado número de procesos.
- *Biorrefinerías de fase III.* Son aquellas que poseen mayor interés y proyección de futuro. Utilizan varias materias primas que, por medio de la amplia integración de numerosos procesos de transformación, obtienen varios productos de interés y valor económico aprovechando los subproductos producidos en las diversas transformaciones, reduciendo, por lo tanto, la cantidad de residuos generados.

Epílogo

Hemos visto que el Antropoceno parece ser una nueva época geológica en la que los seres humanos se han convertido en el factor de influencia mayor de la Tierra. El calentamiento global es una de las características del Antropoceno. Por otro lado, muestra nuestra dependencia a la capacidad del planeta para sustentar nuestra existencia. Lo anterior aboga por un futuro sustentable que incluya tecnologías también sustentables. Y es que nada garantiza que la adaptación agresiva protagonizada por la especie humana no termine siendo una desadaptación de consecuencias fatales.

En palabras del historiador medioambiental John McNeill, hemos convertido la Tierra en un gigantesco laboratorio, sin que podamos anticipar el resultado de un experimento todavía en marcha. ¿Hemos de continuarlo, detenerlo o acelerarlo? Salta a la vista que el Antropoceno constituye una hipótesis científica con una fuerte carga moral: el reconocimiento de que los seres humanos han transformado de forma masiva la naturaleza implica que ahora tienen —tenemos— una responsabilidad hacia el planeta: como hogar de la especie humana, como hábitat para otras especies, como entidad significativa en sí misma.

De acuerdo con Steffen y Crutzen, las características del Antropoceno se desarrollaron en tres etapas, comenzando con la industrialización, seguida de la Gran Aceleración, que continúa hasta el presente, caracterizada por el crecimiento poblacional, la urbanización, el escalamiento del consumo y el desarrollo de la biología sintética. Todo lo anterior va aparejado de un colapso global de los ecosistemas, explotación de los recursos, impacto en la

biodiversidad y, desde luego, calentamiento global. La tercera etapa comienza en el presente, como un periodo de reciente concientización en torno del impacto humano y de los primeros intentos de crear un sistema de gobernanza global que maneje las relaciones de la humanidad con el sistema terrestre, que, a juicio de los autores, poco ha avanzado.

En contraste con la edad de la modernidad, en la que los humanos fueron conceptualizados como opuestos y excediendo el ambiente natural, la Tierra fue humanizada y los seres humanos naturalizados en el Antropoceno. Según Zalasiewicz, el Antropoceno representa una nueva fase en la historia tanto de la humanidad como de la Tierra, en la que las fuerzas naturales y humanas se entremezclan de manera que el destino de una determina el destino de la otra.

La humanidad no puede seguir siendo concebida sin el ambiente natural y tecnológico del cual depende, y la población del planeta hace imposible conceptualizar la naturaleza sin el continuo sustento y desarrollo. Se sabe cada vez con mayor certeza que la humanidad está usando más recursos naturales de los que la Tierra puede proveer y que a futuro necesita dos o más planetas para soportar nuestro moderno modo de vivir, por lo que la siguiente fase del Antropoceno debe consistir en la administración cuidadosa para asegurar la sustentabilidad de los sistemas que soportan la vida; es decir, se debe edificar una cultura que crezca con la riqueza biológica del planeta en lugar de desperdiciarla. El científico Alexander von Humboldt decía hace unos 200 años que debíamos adaptar nuestra cultura para sostener lo que se podía llamar el “organismo mundial”. Humboldt quería que viésemos crecer nuestras capacidades como parte de este organismo mundial, y no a costa suya.

Esta manera simbiótica de ver el curso de la naturaleza ha sido conceptualizada por Peter Sloterdijk como un “biomimetismo”, ya que los recientes desarrollos en tecnología y ciencia, como la biotecnología y la biología sintética, muestran que no son puramente naturales ni tecnológicas, sino más bien formas híbridas de la tecnología similares a las que emplea la naturaleza. De hecho, las tecnologías biomiméticas en el Antropoceno no sólo semejan a la naturaleza, sino que usan los principios naturales para crear cosas hacia donde la evolución nunca se ha dirigido. Estas dos formas de bio-

mimetismo, como una imitación y como una perfección de la naturaleza, se encuentran en la tradición metafísica.

Para Aristóteles, la tecnología y la naturaleza son esencialmente iguales, ya que la tecnología mimetiza a la naturaleza. El biomimetismo como perfeccionador de la naturaleza presupone una deficiencia en ella. En el Antropoceno, esta deficiencia se puede conceptualizar como la incapacidad de la Tierra de acomodar una población mundial creciente y asegurar la sustentabilidad de los sistemas que soportan la vida al mismo tiempo. Por esa razón, la naturaleza debe complementarse con la tecnología; por ejemplo, con estrategias de mitigación o geoingeniería que aseguren la sustentabilidad de los sistemas de soporte de la vida que posee la Tierra.

Bibliografía

- (1) IRWIN, R., *Bienvenido al Antropoceno*, París, UNESCO, 28 de febrero de 2018. <<https://www.unesco.org/es/articles/bienvenidos-al-antropoceno-0>>
- (2) HOFFMAN, A. J., y D. Jennings, "Institutional Theory and the Natural Environment", *Organization and Environment*, vol. 28, núm. 1, 2015.
- (3) STEFFEN, W., et al., "Trajectories of the Earth System in the Anthropocene", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, núm. 33, 2018, pp. 8252-8259. <<https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>>
- (4) SIMON, Z. B., "Why the Anthropocene Has No History. Facing the Unprecedented", *The Anthropocene Review*, vol. 4, núm. 3, 2017, pp. 239-245. <<https://doi.org/10.1177/2053019617742170>>
- (5) ROWLEY-CONWY, P., "The Concept of Prehistory and the Invention of the Terms Prehistoric and Prehistorian", *European Journal of Archeology*, vol. 9, núm. 1, 2006.
- (6) ROWBOTTON, *Critical Rationalism. A Philosophical Investigation*, Nueva York, Routledge, 1962.
- (7) UNIVERSIDAD DE CHICAGO, *The Structure of Scientific Revolution*, Chicago, 1970.
- (8) KAMEL, L., *History and Legacy of the Colonial Mindset. Perspectives on History*, 2022.
- (9) CRUTZEN, P. J., y E. F. Stoermer, "The 'Anthropocene'", *IGBP Newsletter*, núm. 41, mayo de 2000, pp. 17-18.
- (10) TRISCHLER, H., "El Antropoceno, ¿un concepto geológico o cultural, o ambos?", *Desacatos*, núm. 54, 2017, pp. 40-57. <<https://doi.org/10.29340/54.1739>>
- (11) STEFFEN, W., et al., "The Trajectory of the Anthropocene. The Great Acceleration", *The Anthropocene Review*, vol. 2, núm. 1, 2015, pp. 81-98. <<https://doi.org/10.1177/2053019614564785>>
- (12) STOPPANI, A., Milán, Fratelli Dumolard, 1884.
- (13) MARSH, G. P., *Man and Nature, or Physical Geography as Modified by Human Action*, ed. de D. Lowenthal, Universidad de Washington, 2003.
- (14) LE CONTE, J., *Comped of Geology*, Appleton, 1878.
- (15) McNEILL, J. R., y P. Engelke, "Into the Anthropocene. People and Their Planet", en

- A. Iriye, *Global Interdependence. The World after 1945*, Cambridge, Universidad de Harvard, 2014, pp. 365-533.
- (16) PERALTA, C., *El Antropoceno en la sociedad de riesgo*, Universidad de Costa Rica (Sustentabilidad y Estado Ecológico del Derecho), 2011.
- (17) CARSON, R., *Silent Springs*, Houghton Mifflin, 1962.
- (18) LATOUR, B., *Facing Gaia. Eight Lectures on the New Climatic Regime*, Polity Press, 2017.
- (19) MOORE, J., "Introduction", en J. Moore, *Anthropocene or Capitalocene. Nature History or the Crisis of Capitalism*, Oakland, 2016, pp. 1-13.
- (20) GEYER, R., et al., "Production, Use and Fate of All Plastics Ever Made", *Science Advances*, vol. 3, núm. 7, 2017.
- (21) ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN (FAO), *Informe principal*, Roma, FAO, 2021.
- (22) SCHIFTER, I., y C. González Macías, *La Tierra tiene fiebre*, México, FCE (La Ciencia para Todos), 2005.
- (23) BALVANERA, P. et al., "Quantifying the Evidence of Biodiversity Effects on Ecosystem Functioning and Services", *Ecology Letters*, vol. 9, núm. 10, 2006, pp. 1146-1156. <<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>>
- (24) SMIL, V., "Phosphorous in the Environment. Natural Flows and Human Interferences", *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 25, 2000, pp. 53-88. <<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.53>>
- (25) BOBBINK, K., et al., "Global Assessment of Nitrogen Deposition Effects on Terrestrial Plant Diversity. A Synthesis", *Ecological Applications*, vol. 20, núm. 1, 2000, pp. 30-59. <<https://doi.org/10.1890/08-1140.1>>
- (26) MAX PLANK INSTITUTE FOR THE HISTORY OF SCIENCE, *Anthropocene curriculum*, Berlín. <<https://www.anthropocene-curriculum.org/contribution/frequently-asked-questions>>
- (27) MALDONADO, M. A., *Antropoceno. La política en la era humana*, Penguin Random House, 2008.
- (28) LEWIS, S. L., y M. A. Maslin, "Defining the Anthropocene", *Nature*, vol. 519, 2015, pp. 171-180.
- (29) GUERRERO, M., e I. Schifter, *La huella del agua*, México, FCE, 2011.
- (30) DICKENS, Ch., *Hard Times*, Inglaterra, Bradbury & Evans, 1854.
- (31) MONASTERSKY, R., "First Atomic Blast Proposed as Start of Anthropocene", *Nature*, 2015. <<https://doi.org/10.1038/nature.2015.16739>>
- (32) STEFFEN, E., P. J. Crutzen y J. R. McNeill, "The Anthropocene. Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature", *A Journal of the Human Environment*, vol.36, núm.8,2007,pp.614-621.<[https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:-TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:-TAAHNO]2.0.CO;2)>
- (33) MCPHEARSON, T., S. Parnell, D. Simon, O. Gaffney, Th. Elmqvist, X. Bai, D. Roberts y A. Revi, "Scientists Must Have a Say in the Future of Cities", *Nature*, vol. 538, 2016, pp. 165-166. <<https://doi.org/10.1038/538165a>>
- (34) VERNADSKI, V. I., *The Biosphere*, 1926, versión traducida y anotada de Springer, Nueva York, 1998.

- (35) HAFF, P., "Humans and Technology in the Anthropocene. Six Rules", *The Anthropocene Review*, vol. 1, núm. 2, 2014, pp. 126-136. <<https://doi.org/10.1177/2053019614530575>>
- (36) ZALASIEWICZ, J., *et al.*, "The Anthropocene: Comparing its Meaning in Geology (Chronostratigraphy) with Conceptual Approaches Arising in Other Disciplines", *Earth's Future*, vol. 9, núm. 3, marzo de 2021. <<https://doi.org/10.1029/2020EF001896>>
- (37) WEISMAN, A., *The World without Us*, Nueva York, Thomas Dunne y St. Martin's, julio de 2007.
- (38) KUMAR, P., "Environmental Degradation by Invasive Alien Plants in the Anthropocene. Challenges and Prospects for Sustainable Restoration", *Anthropocene Science*, vol. 1, 2022, pp. 5-28.
- (39) YOUNG, O. R., "Introduction. The Age of Complexity", en *Governing Complex Systems. Social Capital for the Anthropocene*, Cambridge, MIT, 2017, pp. 1-22. <<https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262035934.003.0001>>
- (40) BOULDING, K. E., *The Meaning of the Twentieth Century. The Great Transition*, Nueva York, Harper and Row, 1964.
- (41) ROCKSTRÖM, J., *et al.*, "A Safe Operating Space for Humanity", *Nature*, vol. 461, 24 de septiembre de 2009, pp. 472-475.
- (42) MOHORČIČ, J., "Energy Intensity and Human Mobility after the Anthropocene", *Sustainability*, vol. 12, núm. 6, 2020, pp. 2376. <<https://doi.org/103390/su12062376>>
- (43) KOBAYASHI, S., S. Plotkin y S. K. Ribeiro, "Energy Efficiency Technologies for Road Vehicles", *Energy Efficiency*, vol. 2, 2009, pp. 125-137. <<https://doi.org/10.1007/s12053-008-9037-3>>
- (44) SCHIFTER, I., y E. López-Salinas, *Usos y abusos de las gasolinas*, México, FCE (La Ciencia para Todos, 159), 1988.
- (45) KAYA, Y., *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth. Interpretation of Proposed Scenarios*, trabajo presentado en el IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, París, 1990.
- (46) GUO, M., W. Song y J. Buhain, "Bioenergy and Biofuels. History, Status, and Perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, febrero de 2015, pp. 712-725. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>>
- (47) VASIĆ, K., Ž. Knez y M. Leitgeb, "Bioethanol Production by Enzymatic Hydrolysis from Different Lignocellulosic Sources", *Molecules*, vol. 26, núm. 3, 2021, p. 753. <<https://doi.org/10.3390/molecules26030753>>
- (48) LACKNER, M., "3rd-Generation Biofuels: Bacteria and Algae as Sustainable Producers and Converters", en W. Y. Chen, T. Suzuki y M. Lackner, *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, Nueva York, Springer, 2015, pp. 165-166. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6431-0_90-1>
- (49) LÜ, J., C. Sheahanb y P. Fu, "Metabolic Engineering of Algae for Fourth Generation Biofuels Production", *Energy & Environmental Science*, vol. 4, núm. 7, 2011, pp. 2451-2466. <<https://doi.org/10.1039/C0EE00593B>>

Notas sobre los autores

Isaac SCHIFTER

Doctor en química por la Universidad Claude Bernard de Lyon (Francia) y químico farmacéutico biólogo por la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Desde 1970 su actividad profesional la ha realizado fundamentalmente en el Instituto Mexicano del Petróleo como investigador y en puestos gerenciales. Es investigador emérito del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del Conahcyt.

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55993743600>

Academia: <https://independent.academia.edu/IsaacSchifterSecora>

María del Carmen GONZÁLEZ MACÍAS

Doctora en conservación de recursos naturales por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Cibnor); maestra en Ciencias por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y bióloga por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Desde 1982 ha realizado su actividad profesional en el Instituto Mexicano del Petróleo como jefa de proyectos y líder de especialidad en estudios de contaminación por petróleo en ecosistemas marinos. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del Conahcyt.

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56013844700>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Maria-Del-Carmen-Gonzalez-Macias-2>

Google Académico: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=zFNp5HoAAAAJ&hl=es&oi=ao>

Índice de figuras y cuadros

Figuras

Figura 1. El Holoceno	19
Figura 2. Los componentes del sistema terrestre	24
Figura 3. El clavo dorado más antiguo que se encuentra en Australia	42
Figura 4. El intercambio de productos agrícolas entre América y Europa	45
Figura 5. La era atómica	48
Figura 6. Factores e impactos de la invasión de plantas	66
Figura 7. Contribución de las energías renovables al sistema terrestre	92
Figura 8. El primer motor a gasolina	101
Figura 9. Columna de destilación del petróleo	104
Figura 10. La electrolisis del agua	114
Figura 11. El pretratamiento de la celulosa	137
Figura 12. Mecanismo de recombinación	146
Figura 13. Diseño del concepto de biología sintética	149

Cuadros

Cuadro 1. El Cenozoico, sus periodos y épocas	18
Cuadro 2. Componentes del sistema terrestre	21
Cuadro 3. Parámetros socioeconómicos de la Gran Aceleración ...	49
Cuadro 4. Tendencias del sistema Tierra de la Gran Aceleración ..	50
Cuadro 5. Concepto de la tasa de retorno energético	71

Cuadro 6. Concepto de la economía circular	75
Cuadro 7. Los límites planetarios de los ciclos biogeofísicos	82
Cuadro 8. Percepción a corto y largo plazo de los problemas de la humanidad	87
Cuadro 9. Esquema de la transformación de la primera generación	135
Cuadro 10. Procesos empleados en la segunda generación	139
Cuadro 11. Productos obtenidos con la tercera generación	141
Cuadro 12. Esquema de proceso de una refinería	157

Índice general

Sumario.	7
Resumen	9
Prólogo.	11
Capítulo I	15
Nuestra relación con la energía	15
El Holoceno	17
La ciencia del sistema terrestre	20
El Antropoceno	23
¿Capitaloceno o Antropoceno?	29
Algunas evidencias del Antropoceno: los mayores problemas. . .	31
Las estacas doradas	40
¿Una nueva estaca dorada?.	41
Teorías del inicio del Antropoceno	42
¿Hay un buen Antropoceno?	51
Negación colectiva	52
¿Hay solución?.	53
La biosfera	55
La tecnosfera.	55
Descripción literaria de un planeta sin humanos	58
¿Qué pasa si desaparecemos del planeta?.	59

Ríos en las ciudades.	60
La llegada de la “megafauna”.	62
Especies invasoras.	64
El riesgo	66
La complejidad y el Antropoceno	67
Riesgo de nuevos conflictos	68
La tasa de retorno energético	70
Ciclo de vida.	72
Economía circular.	73
 Capítulo II	 79
El advenimiento de las carreteras	79
Una mirada actual	81
Percepción de los problemas de la humanidad	86
Rivalidades emergentes por los recursos	88
La transición energética	88
Tendencias de movilidad urbana	95
El consumo energético de los vehículos	98
El motor a gasolina y diésel	100
¿De dónde vienen los combustibles fósiles?	104
Motores de combustión interna	105
Formación de contaminantes	106
¿Cuánto CO ₂ emiten los coches de gasolina y diésel?	107
Riesgos para la salud	107
La descarbonización del sistema energético	109
Cómo afecta la agricultura	112
La descarbonización del sector transporte	112
Hidrógeno verde: un combustible sin emisiones contaminantes	114
Vehículos eléctricos	116
Cero emisiones	117
Atributos para verdaderas cero emisiones	118
La crónica de los biocombustibles.	118
Materias primas para producir biocombustibles.	124
Métodos para convertir la biomasa	128
Producción de la biomasa	130

Capítulo III	133
Una apología del carbono	133
Las generaciones de biocombustibles	134
Combustibles de primera generación.	135
Limitaciones de los combustibles de primera generación	137
Segunda generación de biocombustibles	138
Tercera generación de biocombustibles	140
Cuarta generación.	143
Tejidos vegetativos de plantas	146
Los genes.	147
¿Qué podemos aprender del estudio de la estructura genética de una especie?	148
Biología sintética	149
Modificando la pared celular	150
Degradación de plásticos y conversión en combustibles	151
El estrés y las algas	151
¿Qué son los marcadores moleculares y cómo se utilizan?	152
La ingeniería en plantas	153
¿Qué es la bioeconomía?	155
Biorrefinerías	156
Epílogo.	159
Bibliografía	163
Notas sobre los autores	167
Índice de figuras y cuadros.	169

Estamos en el Antropoceno. ¿Es el fin de los tiempos?, de Isaac Schifter y María del Carmen González Macías, publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se terminó de imprimir en julio de 2024, en los talleres de Litográfica Ingramex S.A. de C.V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 200 ejemplares impresos y en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML.

En el año 2000 el Nobel de Química Paul Crutzen describió al Antropoceno como una propuesta para designar una nueva era geológica en la cual la humanidad era la protagonista, a raíz de que las actividades humanas han tenido un enorme impacto sobre el sistema terrestre en términos geológicos, biológicos y climáticos. Los científicos proponen, asimismo, marcadores útiles que dan cuenta del inicio del Antropoceno, los cuales incluyen carreteras, microplásticos, mercurio o los radionucleótidos.

En los países industrializados, el transporte representa la segunda fuente de gases de efecto invernadero, después de la generación de electricidad. Una manera de mejorar la eficiencia automotriz es la de modificar la composición de las gasolinas. Al formular combustibles empleando componentes derivados de la biomasa, se obtienen carburantes de bajo contenido de carbono, con lo cual se disminuye la emisión de estos gases al tiempo que se mantiene un óptimo desempeño vehicular.

Usualmente los biocombustibles líquidos se dividen en cuatro generaciones, dependiendo del material que se emplea en la transformación. La primera generación emplea materiales almidonados, tales como el azúcar de caña, que se transforman en alcohol. La segunda emplea biomasa lignocelulósica no comestible que se transforma en moléculas de azúcar y de ahí se derivan los combustibles. La tercera generación encuentra su fuente de producción en la biomasa del mar, la cual requiere menos área y es efectiva para la disminución de gases de efecto invernadero. La cuarta generación la constituyen la ingeniería metabólica y la genética.

Considerando que el futuro es finito, así como las consecuencias de nuestras acciones como humanidad, podemos minimizar nuestros daños colaterales a la biosfera y maximizar las materias primas para la siguiente fase del planeta.



Isaac Schifter es químico farmacéutico biólogo egresado de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y doctor por la Universidad Claude Bernard (Francia). Labora en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) como investigador, obtuvo el Premio Nacional de Química “Andrés Manuel del Río” y es investigador emérito del SNII del Conahcyt.



María del Carmen González Macías es bióloga egresada de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I), maestra en Ciencias por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctora por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Labora en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y es miembro del SNII del Conahcyt.



Dimensions



DOI.ORG/10.52501/CC.195



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS

HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS
www.comunicacion-cientifica.com

ISBN: 978-607-9104-46-7



9 786079 104467