





El Reloj del Apocalipsis  
*¿La antesala de un colapso ecológico?*





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



**COLECCIÓN  
CONOCIMIENTO**

Cada libro de la Colección Conocimiento es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos. Invitamos a ver el proceso de dictaminación transparentado en



<https://doi.org/10.52501/cc.017>

[www.comunicacion-cientifica.com](http://www.comunicacion-cientifica.com)

Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de libros de investigación digitales e impresos en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales de dictaminación, comités y ética editorial, acceso abierto, medición del impacto de la publicación, difusión, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indización internacional.

# El Reloj del Apocalipsis

*¿La antesala de un colapso ecológico?*

ISAAC SCHIFTER  
CARMEN GONZÁLEZ-MACÍAS



---

Schifter, Isaac

El Reloj del Apocalipsis : ¿la antesala de un colapso ecológico? / Isaac Schifter, Carmen González-Macías. — Ciudad de México : Comunicación Científica, 2021. — 145 páginas : ilustraciones . — (Colección Conocimiento).

ISBN: pendiente

DOI 10.52501/cc.017

1. Mitigación del cambio climático. 2. Innovaciones tecnológicas - Aspectos ambientales. I. González Macías, Carmen, autor. II. Título. III. Serie

LC: QC903

Dewey: 363.7

---

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2021



Diseño de portada: Francisco Zeledón

Diseño de interiores: Guillermo Huerta

D.R. Ediciones Comunicación Científica S.A. de C.V., 2020

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

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

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

info@comunicacion-cientifica.com • infocomunicacioncientifica@gmail.com

www.comunicacion-cientifica.com  comunicacioncientificapublicaciones

 @ComunidadCient2

ISBN: 978-607-99505-6-9

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.017>

Este libro es una publicación de acceso abierto con los principios de Creative Commons Attribution 4.0 International License que permite el uso, intercambio, adaptación, distribución y transmisión en cualquier medio o formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor, origen y fuente del material gráfico. Si el uso del material gráfico excede el uso permitido por la normativa legal deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

# Contenido

<i>Resumen</i> .....	9
<i>Prefacio</i> .....	11
I. <i>El colapso de la civilización</i> .....	17
II. <i>Adaptación</i> .....	75
III. <i>Mitigación</i> .....	99
IV. <i>Epílogo</i> .....	133
<i>Bibliografía</i> .....	137
<i>Sobre los autores</i> .....	140
<i>Índice de figuras y tabla</i> .....	141
<i>Índice general</i> .....	143





## Resumen

El cambio climático pone en peligro nuestras esperanzas. “Estamos al borde de un abismo y moviéndonos en la dirección equivocada”, declara el secretario de las Naciones Unidas en 2021. Debemos, por tanto, actualizar nuestro lenguaje para describir lo que ocurre: en la actualidad ya hablamos de mega huracanes, super tormentas y lluvias intensas. Para que esto no siga sucediendo se necesita un recorte de 45% de las emisiones para 2030, aunque se predice que ese año aumentarán 16%. Eso nos condenaría a un escenario infernal por el aumento de temperatura de al menos 2.7 °C sobre niveles preindustriales. Un gran número de países se ha comprometido a alcanzar cero emisiones netas de gases invernadero para 2050. Se argumenta que nos enfrentamos a un futuro “apocalíptico”, prediciendo una transformación de la temperatura que será catastrófica, inevitable. En muchos aspectos, como veremos, hemos pasado el punto de no retorno, por lo cual no podemos seguir evadiendo el problema, sino más bien imaginar cómo podemos detenerlo. Existe una palabra para esta nueva era en la que vivimos: el *Antropoceno*, término que representa la idea de que hemos entrado en una nueva era geológica en la historia de nuestro planeta.



## Prefacio

Desde la época de los antiguos griegos las teorías académicas y las creencias populares especularon que, arrasando con un bosque, irrigando un desierto, drenando una marisma o limpiando las tierras de pastoreo, podían cambiar la temperatura y aumentar el régimen de lluvias en las zonas cercanas. A finales del siglo XIX los meteorólogos habían acumulado suficiente información experimental sobre el clima para verificar si la lluvia iba siguiendo los cultivos o escapaba en los lugares podados. Ambas ideas fallaron en verificar una u otra teoría. Si los espectaculares cambios negativos generados por la humanidad no alteraban el clima de una región, parecía entonces innecesario considerar el impacto en otras especies. Hasta la primera mitad del siglo XX los científicos que estudiaban el clima trataban a los ecosistemas como pasivos. Los desiertos y los bosques se expandían o contraían como una respuesta indiferente a los cambios climáticos, los cuales, se creía, eran causados por perturbaciones en la disposición de las montañas o bien variaciones del Sol y otras fuerzas de gran magnitud que ejercían un impacto sobre la superficie del planeta, existían unos cuantos científicos que no veían las cosas de esa manera. Uno de ellos fue el gran pensador y geoquímico ruso Vladimir I. Vernadsky (1863-1945), quien en sus últimos años de existencia insistía en que la humanidad era un factor geológico que afectaba y cambiaba el medio ambiente natural. Durante su trabajo en la industria del transporte reconoció que el volumen de materiales producido por los humanos estaba alcanzando proporciones geológicas. Analizando los procesos bioquímicos concluyó que el

oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono que conformaban la atmósfera terrestre, estaban siendo incrementados por las actividades humanas. Más aún, insistía en que la química de prácticamente cualquier elemento de la corteza terrestre estaba influenciada por procesos biológicos. En 1920 publicó trabajos argumentando que los organismos vivientes constituían una fuerza que modelaba al planeta de la misma manera que lo hacían las fuerzas físicas. Más allá de lo que pregonaba visualizó una enorme fuerza que se empezaba a sentir en el juego del planeta: la inteligencia. A pesar de que el pronunciamiento visionario de Vernadsky en el que veía a la humanidad como una gran fuerza geológica no fue muy conocido, unos cuantos científicos empezaron a estudiar cómo las criaturas vivientes afectaban la química de la superficie terrestre. El primer investigador que escribió sobre la influencia de la vida en el clima fue el ingeniero inglés G. S. Callendar (1898-1964), quien en 1938 publicó argumentos de que las emisiones de dióxido de carbono iban en aumento y estaban produciendo un calentamiento del planeta. Pareciera ser que prácticamente toda discusión acerca del calentamiento global inicia y termina con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El dióxido de carbono es el gas que más preocupa actualmente a los expertos en cambio climático debido a su gran cantidad procedente de la acción humana. Hoy en día la concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$  ronda en las 415 partes por millón por volumen (ppm), lo que significa que 415 litros por cada millón de litros en el aire son de dióxido de carbono. Se calcula que actualmente la cantidad de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es de tres billones de toneladas métricas. El  $\text{CO}_2$  es un gas de efecto invernadero, lo que significa que permite que la luz visible emitida por el Sol atraviese la atmósfera al tiempo que ésta absorbe y envía al espacio la energía infrarroja (de mayor longitud de onda que la luz visible), con lo cual se calienta el planeta. Desde los inicios de la revolución industrial empezó a incrementarse abundantemente la emisión de dióxido de carbono y otros gases a la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles al tiempo que se arrasaba con los bosques para proveerse de madera (que naturalmente absorben  $\text{CO}_2$ ), con lo cual la temperatura terrestre se fue incrementando. Por otra parte, para un compuesto químico que se encuentra casi en cualquier lugar del planeta, el metano todavía nos sorprende. Es uno de los más potentes gases de efecto invernadero y no queda claro el porqué. De lo que sí

estamos seguros es que su concentración en la atmósfera ha aumentado constantemente desde la revolución industrial. Cuando a finales del siglo XVIII el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) identificó por primera vez el metano como el gas inflamable en las burbujas que emergían de los pantanos, no pudo imaginarse la importancia que este gas podría llegar a tener para la sociedad humana en los siglos venideros. La civilización ha marchado ciegamente hacia el desastre porque los humanos tienen la creencia de que el mañana será semejante al hoy. Desde el punto de vista de la civilización muchos reportes ofrecen una terrible predicción de los efectos del calentamiento global, del cual los climatólogos predicen elevaciones de temperatura que oscilan de 2 °C en el curso de nuestra generación y 7 °C de aquí a unos 90 años. Algunos climatólogos argumentan que nos enfrentamos a un futuro “apocalíptico”, prediciendo una transformación de la temperatura que será catastrófica: no posible, no potencial, inevitable. En muchos aspectos, como veremos, hemos pasado el punto de no retorno, en el cual no se trata de evadir el problema, sino de cómo podemos detenerlo. Existe una palabra para esta nueva era en la que vivimos: el *Antropoceno*, término que representa la idea de que hemos entrado en una nueva época geológica en la historia, caracterizada por la llegada de la especie humana que se ha comportado como una fuerza geológica; es decir, el término se ha aceptado como una evidencia de que el incremento en los cambios ocasionados por el calentamiento global afectará no sólo el clima del mundo, también la diversidad biológica e igualmente la propia geología. El reto que pone en la mesa el Antropoceno no es solamente concerniente a la seguridad, los mercados de alimentos y energía o a nuestra forma de llevar la vida, a pesar de que esos retos son reales, profundos e inescapables. El mayor reto que pone el Antropoceno es referente al sentido de lo que significa ser humano. Dentro de 100 años enfrentaremos temperaturas muy calurosas, elevación de los niveles de los mares y una concentración numerosa en centros de población. En 1 000 años, si no detenemos la emisión de gases de efecto invernadero estaremos viviendo en un planeta como el de la era del Pleistoceno, hace tres millones de años, con océanos 23 metros más altos que los actuales. Enfrentamos el colapso inminente de la agricultura, de los sistemas de navegación y de la energía, de los cuales la economía global depende, la gran extinción de la biósfera,

que ya está en camino, y la nuestra. Si el *Homo sapiens* (o alguna variante genética) sobrevive en los próximos milenios, lo hará en un mundo irrecientemente diferente del que hoy habitamos. A pesar de ello, el hecho de que la situación no ofrece buenas perspectivas no nos absuelve de la obligación de encontrar la manera de seguir adelante. Nuestro apocalipsis está sucediendo día a día y nuestro gran reto es aprender a vivir con esa verdad. En el curso de la historia la humanidad ha avanzado explotando el medio ambiente para proveerse de sus recursos y los servicios esenciales. Existe hoy en día una creciente toma de consciencia de que dicho patrón de desarrollo no puede continuar de la manera tradicional en la que se ha venido haciendo hasta ahora. A primera vista parece discordante que la humanidad, en general, haya experimentado una mejoría sustancial y sostenida en la esperanza de vida al tiempo que los ecosistemas de todo el mundo se degradan a un ritmo sin precedentes. A raíz de esta aparente contradicción una evaluación de las diferencias entre las tendencias ambientales y el bienestar de la humanidad han dado lugar a varias posibles explicaciones del fenómeno. Una primera interpretación apunta a que el bienestar es dependiente de la prestación de servicios alimenticios, de los cuales se ha incrementado su demanda en detrimento de los que son capaces de suministrar los ecosistemas. Una segunda explicación afirma que la tecnología y la infraestructura han desvinculado el bienestar de la humanidad de la naturaleza, al incrementar la eficiencia con la que hoy en día se pueden explotar los beneficios que proveen los ecosistemas. Otra más afirma que puede existir un rezago en el tiempo que transcurre entre el deterioro de los ecosistemas y las subsecuentes reducciones en el bienestar humano que ocasionan. A pesar de lo dicho, los efectos en salud producto de los cambios del medio ambiente incluyen los climáticos, la acidificación de los océanos, la degradación del campo, la falta de agua, la sobreexplotación de la pesquería y la pérdida en la biodiversidad, entre otros. Todo eso pone en riesgo lo que hemos ganado a nivel global de salud poblacional en las últimas décadas y muy posiblemente el riesgo será incrementalmente dominante en la segunda mitad de este siglo, gobernado por una alta desigualdad e ineficiencia de los patrones de consumo de los recursos. Como informa el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), “la captación y el almacenamiento

del CO<sub>2</sub> constituye un proceso consistente en la separación del CO<sub>2</sub> emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo”. Como se describirá posteriormente, otras opciones de mitigación comprenden la mejora de la eficiencia energética, la preferencia de combustibles que dependan menos intensivamente del carbono, las fuentes de energía renovables, el perfeccionamiento de los sumideros biológicos y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero diferentes del CO<sub>2</sub>. La cantidad de CO<sub>2</sub> actual en la atmósfera requiere además remover directamente grandes cantidades del gas empleando tecnologías que lo confinen sin que ellas generen a su vez más emisiones del gas, es decir, tecnologías de emisiones negativas. Las tecnologías de emisiones negativas difieren de las aproximaciones convencionales de mitigación del clima en que no buscan reducir la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido, sino más bien remover el ya presente en la atmósfera. La brecha por recorrer entre la promesa que brindan estas tecnologías y la habilidad real de vencer el aumento de emisiones parece ser insalvable en términos de la viabilidad tecnológica y por la magnitud y escala que se requiere alcanzar. La ventana de oportunidades para combatir el cambio climático no se ha cerrado y las tecnologías de nulas emisiones deberán seguir imperando como única alternativa en el futuro.





## I. El colapso de la civilización

El Reloj del Apocalipsis es un instrumento simbólico que advierte a la sociedad lo cerca que está de destruir el planeta gracias al desarrollo de tecnologías peligrosas que ha desarrollado; una llamada de atención de los peligros a los que debe anteponerse, si vamos a sobrevivir en nuestro mundo. Usa la analogía de la especie humana estando siempre “a minutos de la medianoche”, donde ésta representa la “destrucción total y catastrófica de la Humanidad”. Originalmente, la analogía representaba la amenaza de guerra nuclear global, pero desde hace algún tiempo incluye cambios climáticos y todo nuevo desarrollo en las ciencias y nanotecnología que pudiera infligir algún daño irreparable. Cuando el Reloj fue creado, en 1947, el peligro mayor eran las armas nucleares, por esa razón la junta directiva del Boletín de Científicos Atómicos de la Universidad de Chicago inició el tic tac en ese año. La junta está formada por científicos y personas con amplio conocimiento de la tecnología nuclear y la ciencia climática, razón por la cual a partir del año 2007 el tema del cambio de la temperatura terrestre, entre otras calamidades, se incluyó en la evaluación del peligro para la humanidad. La decisión de mover el minutero, ya sea acercándolo a la fatal medianoche o alejándola de ella, se toma cada dos años, pero en los últimos años, desafortunadamente, el minutero cada vez se acerca más a la medianoche. La decisión tomada por la junta directiva se debió a que las tendencias en las dos áreas de mayor preocupación, armas nucleares y cambio climático, no muestran mejoras sustantivas en estos dos últimos años y más bien las han debilitado, sin un esfuerzo real de reemplazarlas

con nuevos sistemas de manejo. Los líderes del mundo han socavado y minimizado el esfuerzo de las negociaciones y acuerdos que debían mejorar la situación, con el consecuente aumento en el riesgo de grandes desastres. La preocupación sobre la crisis climática en 2019 ha crecido sobre todo por las grandes protestas de los jóvenes en todo el mundo. Sin embargo, a pesar de la indignación pública, los gobiernos siguen lejos de alcanzar las metas de mejora a las que se comprometieron, eso sí, hay grandes discursos, pero pocos planes concretos para limitar las emisiones que dañan el clima del planeta. Y todo ello trae como consecuencia, como hemos visto recientemente, grandes incendios, temperaturas anuales muy calurosas, nunca vistas, y el rápido descongelamiento de los glaciares. De acuerdo con la junta directiva, este año han movido a 100 segundos antes de la media noche y las razones anunciadas son muchas y de ellas tomamos los siguientes párrafos:

Esta situación, dos amenazas mayores a la civilización humana, amplificada por sofisticados métodos tecnológicos propagandísticos, serían lo suficientemente serios si los líderes alrededor del mundo se enfocaran en enfrentar el peligro y reducir el riesgo de una catástrofe. Opuesto a lo deseable, en los últimos tiempos vemos cómo muchos líderes denigran y descartan los métodos más efectivos que son los acuerdos internacionales con sistemas de verificación de cumplimiento.

Dada la falta de acción, y las acciones contraproducentes, la Junta se ha visto forzada a declarar un estado de emergencia que requiere de una atención inmediata en todo el mundo, por lo cual el Reloj marca ahora 100 segundos antes de la medianoche y su tic tac continúa. Los más o menos 60 países que se han comprometido sin muchas vaguedades a llegar a cero emisiones de dióxido de carbono sólo representan 11% de las emisiones totales. Las recientes reuniones propiciadas por las Naciones Unidas también han sido decepcionantes, puesto que los países involucrados no se comprometieron a disminuir aún más las emisiones y menos a proveer apoyo a los países más pobres para hacerlo, incrementando el impacto del daño climático. El Acuerdo de París firmado en 2015 acordó tratar de mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo



de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático. La exploración y explotación de combustibles fósiles (los principales aportadores de contaminación de dióxido de carbono a la atmósfera) continúan creciendo. Un reciente reporte de las Naciones Unidas concluye que globalmente los gobiernos y el sector privado apoyan la sobreproducción del petróleo, la cual casi duplica el nivel que se necesita para respetar los acuerdos de París. Para el año 2030 se planea producir alrededor de 50% más de lo necesario para que la temperatura terrestre no aumente más de 2 °C y respecto al aumento de 1.5 °C, la cantidad en exceso sería de 120%. El análisis anterior sugiere que el conjunto de países planea una producción de combustibles fósiles para el 2030 que generará 39 000 millones de toneladas de dióxido de carbono. Lo anterior representa 53% más de lo que debería emitirse para no sobrepasar los 2 °C y 120% más de lo necesario para no excederse en los 1.5 °C. Si hablamos de la hulla, la situación es aún más crítica, ya que para 2030 se estima que se producirá 150% más hulla de la que se esperaba generar para no sobrepasar los 2 °C y 280% más para el caso de no exceder el calentamiento global en 1.5 °C. Existe un antagonismo político activo hacia la ciencia, las autoridades desdeñan las opiniones de los expertos, creando dudas y hasta miedo sobre la bien establecida ciencia del cambio climático y otros retos urgentes de comba-

tir. Se ha intentado emplear una propaganda en servicio de las agendas políticas, la cual se ha agudizado con el internet, que provee un amplio y poco oneroso acceso a las audiencias mundiales que facilitan la emisión de mensajes falsos y manipuladores a una gran población, lo que permite aumentar sus prejuicios sobre lo que descubre y alerta la ciencia, impidiendo a los ciudadanos separar la verdad de la ficción. Tómese en consideración que lo que hemos mencionado sobre el medio ambiente y lo nuclear es válido para las nuevas tecnologías, que incluyen el desarrollo de la ingeniería biológica, armas de alta velocidad (hipersónicas) y las espaciales. Un ejemplo adicional lo representa el desarrollo de la ingeniería genética y las tecnologías de biología sintética, para lo cual las compañías coleccionan vastas cantidades de datos relacionados con la salud, incluyendo los genómicos, ostensiblemente con el propósito de mejorar la salud. Esos mismos datos pueden emplearse en el desarrollo de armas biológicas altamente efectivas. La necesidad de acciones es urgente, ya que existen pasos prácticos y concretos que los líderes pueden tomar y los ciudadanos demandar que mejore el estado absolutamente inaceptable en que se encuentra el mundo. No hay razón alguna para que el Reloj se vuelva a atrasar, se ha hecho en el pasado cuando los líderes actuaron, algunas veces con gran presión, apoyados por científicos bien informados e involucrados en los problemas que aquejan a la sociedad. Nos cuenta Ángel Pérez, catedrático de la Universidad de Murcia, España, que los libros de Lewis Carroll están llenos de situaciones y enunciados sugerentes, con fuertes paralelismos con principios científicos. Un ejemplo de esto es el pasaje en el que Alicia corre sin parar jalada de la mano por la Reina Roja, quien gritaba “¡Más rápido, más rápido!”:

—¿Será que todas las cosas se mueven con nosotras? —se preguntó la desconcertada Alicia.

Y la Reina pareció leerle el pensamiento, pues le gritó: —¡Más rápido!, ¡No trates de hablar!

Cuando pararon un momento, Alicia, sorprendida, miró a su alrededor y dijo:



*Alicia y la Reina Roja, ilustración de John Tenniel (1820-1914)*

—Pero ¿cómo? ¡Si parece que hemos estado bajo este árbol todo el tiempo!  
¡Todo está igual que antes!

—¡Pues claro que sí! —convino la Reina—. ¿Y cómo si no?

—Bueno, lo que es en mi país —aclaró Alicia, jadeando aún bastante—, cuando se corre tan rápido como lo hemos estado haciendo y durante algún tiempo, se suele llegar a alguna otra parte...

—¡Un país bastante lento! —replicó la Reina—. Lo que es aquí, como ves, hace falta correr todo cuanto una pueda para permanecer en el mismo sitio. Si se quiere llegar a otra parte hay que correr por lo menos dos veces más rápido.

Leigh van Valen planteó la hipótesis de la Reina Roja como principio ecológico y evolutivo según el cual las especies tienen que “correr” o evolucionar para mantenerse en el mismo lugar o extinguirse. Las especies deben cambiar continuamente para compensar las pérdidas de eficiencia competitiva derivadas de la evolución de las otras especies y así tratar de

evitar extinguirse. Cada mejora en un competidor por los recursos, en los mecanismos de ataque del depredador o en los de defensa de una presa tienen que ser compensados inmediatamente por el contrario. Eso quiere decir que si las especies están en constante lucha por su sobrevivencia en un medio ambiente cambiante contra un gran número de competidores, la extinción es una probabilidad que se puede dar. La emisión continua de gases de efecto invernadero puede causar un calentamiento aún mayor y cambios de larga duración en todos los componentes del sistema climático, incrementando impactos severos e irreversibles para las personas y los ecosistemas. El limitar dichos cambios requerirá de una reducción sustancial y sostenida de las emisiones.

## Fourier y el calentamiento global

Jean-Baptiste Joseph Fourier nació en 1768 en Auxerre, un pueblo situado en las alturas mirando el río Yonne. Su padre era un sastre que procreó por lo menos 15 hijos; poco se sabe sobre su madre, excepto que murió a la edad de 49 años, cuando Jean tenía 9 años, y dos después murió su padre, por lo que los hijos fueron puestos al cuidado de un hospital para huérfanos. Tuvo la fortuna de ser rescatado por una mujer del pueblo que lo salvó de una vida casi de esclavitud y la señora recomendó el joven al obispo de Auxerre, quien a su vez lo enroló en la escuela local militar a cargo de los monjes benedictinos. Un intelectual por naturaleza, Jean tuvo una sólida formación gracias a la tutela de los monjes, y pronto empezó a componer versos de gran calidad para alguien tan joven, pero sobre todo se enamoró de las matemáticas, que se convirtieron en su pasión. En 1798, gracias a que su reputación como matemático se había elevado durante los tres años en París, ganó un puesto de profesor en la Escuela Politécnica, al tiempo en que recibió una carta del Ministerio del Interior. La República estaba necesitada de sus “talentos” para una misión no esclarecida fuera de Francia. Un mes después Fourier se embarcó por primera vez en su vida, uniéndose a la compañía de Napoleón junto con miles de hombres, todos ellos apretujados en 180 barcos sin conocer a dónde iban a parar. Fue en las soleadas tierras egipcias en donde el interés científico de Fourier por el

calor se manifestó. Dado que había sido nombrado secretario del recién creado Instituto de Egipto, poco tiempo tuvo para proseguir sus investigaciones. A su regreso a Francia en 1801, Napoleón lo nombró prefecto del departamento de Isère en donde permaneció los siguientes 12 años. Durante esos años, Fourier reflexionaba sobre la complicada pregunta de cómo se propagaba el calor, o lo que los físicos denominan difusión. Trabajando con objetos de varias formas desarrolló su famosa ecuación de la difusión, que expresa el movimiento del calor dentro de un cuerpo. Sin importar la forma del objeto con el que trabajaba, fuese un cilindro, esfera, rectángulo o anillo, Fourier era capaz de dar cuenta matemáticamente del fenómeno. No satisfecho con lo obtenido, desarrolló una segunda ecuación que trataba acerca del movimiento del calor sobre la superficie de un objeto. A principios de 1820 Fourier empezó a reflexionar sobre el asunto de cómo la Tierra se mantiene lo suficientemente caliente para permitir el rango diverso de flora y fauna que habita su superficie. ¿Por qué el calor generado por los rayos del Sol no se pierde una vez que chocan en la tierra y océanos del mundo? Con papel y lápiz en mano elaboró una nueva hipótesis. Gran parte del calor de hecho se escapa hacia el vacío, pero no todo. El domo invisible que es la atmósfera absorbe el calor solar y lo irradia hacia la superficie terrestre. Comparaba esta envoltura térmica con un domo construido de vidrio, que en esencia estaba constituido por las nubes y los gases invisibles. Agrupando las ideas, el vapor de agua y otros gases simulaban la cámara que recibía y conservaba el calor sin el cual la vida seguramente perecería. Su trabajo fue publicado en 1824, sin embargo, debido a su naturaleza especulativa no fue considerado el mejor trabajo de Fourier y pronto fue olvidado. No fue sino hasta los inicios de la revolución industrial que el artículo de este genio volvió a ver la luz.

## La era del Antropoceno

La dimensión de los procesos de transformación y su impacto sobre los naturales en el planeta han alcanzado tal punto que el ser humano se ha convertido en una fuerza dominante en la transformación de la Tierra. Se trata de un conjunto de alteraciones en la constitución y funcionamiento

de los ecosistemas. Aunque no es el único aspecto, desde luego está estrechamente relacionado con cambios en el clima que han ocurrido con una magnitud sin precedente desde la última glaciación, que se refleja en el incremento de la temperatura promedio del planeta. En consecuencia, cabe pensar que los efectos de las actividades de los seres humanos han escalado niveles planetarios y que se han convertido en una fuerza geofísica global con 95% de certeza de que la actividad humana es la causa dominante del calentamiento. ¿Cómo podemos estar seguros de ser responsables del aumento del dióxido en la atmósfera? Existen muchas líneas de evidencia, una de ellas menciona que los combustibles fósiles al formarse no tenían carbono-14, dado que este isótopo se formó cuando los rayos cósmicos golpearon la atmósfera, pero tiene una vida media de aproximadamente 60 000 años. Por lo que el descenso medido del carbono-14 sólo puede explicarse por la combustión de productos fósiles. De acuerdo con la organización encargada de definir las escalas de tiempo de la Tierra, nos encontramos oficialmente en la era del Holoceno. El Holoceno es el último periodo de la era Cenozoica que abarca desde el final del Pleistoceno (hace aproximadamente 11 700 años) hasta la actualidad. Su nombre proviene de las palabras griegas *holos* (entero, completo) y *kainos* (nuevo). El Holoceno, la etapa histórica que coincide con el inicio de la agricultura y la expansión y evolución de las distintas civilizaciones humanas, es decir, *grosso modo* los últimos 12 000 años, ha llegado a su fin. El trecho interglaciar que define el Holoceno, inusualmente estable en términos de temperatura global, ha terminado, y habríamos entrado en “un intervalo estratigráfico sin precedentes parecidos en los últimos millones de años”. Estaríamos por tanto en una nueva era histórica marcada por la incidencia de la “especie humana” en el planeta Tierra. La noción de que la acción colectiva de los humanos altera la Tierra no es nueva, ideas entorno a la dominación o transformación de la naturaleza por los seres humanos fueron desarrolladas por pensadores como el francés René Descartes (1596-1650) y el inglés Francis Bacon (1561-1626). El término *Antropoceno* (del griego *anthropos*, “ser humano”) se emplea hoy en centenares de libros y artículos científicos, se cita miles de veces y se usa cada vez más en los medios de comunicación. Creado en un principio por el biólogo estadounidense Eugene F. Stoermer (1934-2012), este vocablo



lo popularizó a principios del decenio de 2000 el holandés Paul Crutzen (1933), premio Nobel de Química, para designar la época en la que las actividades del hombre empezaron a provocar cambios biológicos y geofísicos a escala mundial. Ambos científicos sugerían que esas mutaciones habían alterado el relativo equilibrio en que se mantenía el sistema terrestre desde los comienzos de la época holocena. A diferencia de todas las demás especies sobre el planeta, el *Homo sapiens* no sólo ha sido capaz de adaptarse al entorno, sino que igualmente lo ha modificado para su propia conveniencia, lo cual es un privilegio de la especie dominante. Stoermer y Crutzen propusieron que el punto de arranque de la nueva época fuera el año 1784, cuando el perfeccionamiento de la máquina de vapor por el británico James Watt (1736-1819) abrió paso a la revolución industrial y la utilización de energías fósiles. Un dato para tomar en cuenta es el “Sistema Tierra”, una ciencia que abarca la química, la física, la biología y las matemáticas. Fue creada para tratar de comprender nuestro planeta como un sistema integrado mediante las interacciones físicas, químicas, biológicas y humanas que determinan los estados pasados, presente y futuros de la Tierra. Agrupando todos los datos, el sueco Johan Rockström (1965) y el estadounidense Will Steffen (1945), junto con sus colegas del Centro de Resiliencia de Estocolmo, confeccionaron una lista con nueve límites del planeta que sería sumamente peligroso traspasar, cosa que ya se ha producido en el caso de cuatro de ellos, a saber: el clima, la alteración de la cobertura vegetal, la erosión de la biodiversidad o la desaparición de especies animales y la alteración de los flujos biogeoquímicos, en los que los ciclos del fósforo y el nitrógeno desempeñan un papel esencial. Las otras cinco fronteras de la Tierra corresponden al consumo de recursos primarios, utilización de energía, crecimiento demográfico, actividad económica y deterioro de la biosfera. Según el citado informe, desde la segunda Guerra Mundial estos límites se han disparado de tal modo que algunos la han denominado “época de la gran aceleración”. Todas esas tendencias se han calificado de “insostenibles”. Por eso llamaron a esta época “la gran aceleración”. Decía Rockström que “el cambio climático es un hecho científico, como el agujero en la capa de ozono o la órbita de la Tierra alrededor del Sol”. Otros observadores hablan incluso de un periodo de “híperaceleración” a partir del decenio de 1970. Parece haber un

FIGURA 1. *Visión del Antropoceno*

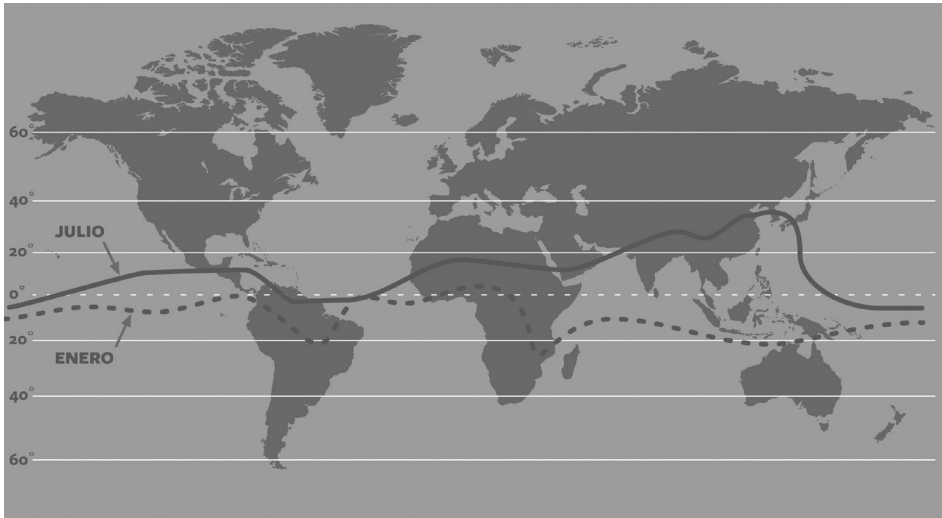
consenso sobre el hecho de que varios parámetros del sistema terrestre han empezado a evolucionar fuera del espectro de variabilidad natural de la época holocena, y también se admite cada vez más el uso de la expresión época antropocena para especificar que esa evolución es de origen humano, marcada fundamentalmente por una modificación del entorno, con consecuencias positivas y negativas (ver la Figura 1).

Un número creciente de científicos proponen que el Antropoceno figure oficialmente en la lista de épocas geológicas al igual que el Holoceno o el Pleistoceno, propuesta presentada ante la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, por sus siglas en inglés). No obstante, para que los especialistas en estratigrafía la refrenden es necesario que se compruebe la existencia de una ruptura universal entre las capas sedimentarias de dos épocas geológicas. El grupo propone que el cambio de periodo se fije en 1950, año de arranque de “la gran aceleración” y de la aparición de diversos compuestos químicos y partículas de plástico de origen antrópico en los sedimentos. De todos modos, aunque no se llegue a reconocer to-

avía que el Antropoceno es una época geológica, eso no invalida el uso que los científicos están haciendo de este concepto. En su corta existencia, el concepto de Antropoceno ha suscitado ya varias controversias e inclusive se ha puesto en tela de juicio el propio vocablo. Historiadores y antropólogos se han interrogado sobre la referencia al *anthropos*, esto es, al ser humano genérico. Y se preguntan si no son el hombre occidental y un determinado sistema económico los responsables de haber traspasado los límites biogeofísicos del planeta. Por eso se han propuesto otras denominaciones como “Occidentaloceno” o “Capitaloceno”. Existen también especialistas en historia global o medioambiental que consideran que no se ha producido una ruptura real y que “la gran divergencia”, esto es, el carácter excepcional del crecimiento occidental se debe situar en una perspectiva a largo plazo.

## La aparición de las primeras ciudades

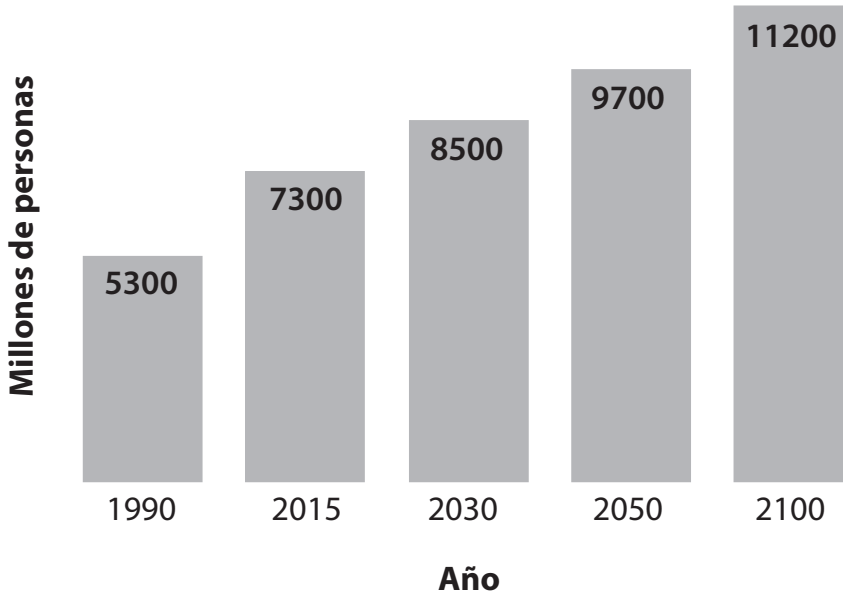
Un ecosistema es un ambiente físicamente definido, formado de dos componentes inseparables. El primero es el biotipo, que se refiere a un ambiente físico particular con características físicas específicas como pueden ser el clima, la temperatura, la humedad, la cantidad de nutrientes, etc. El segundo componente lo constituyen los organismos vivientes tales como animales y plantas o microorganismos, que están en constante interacción y en una situación de independencia. Esta definición es relativamente moderna y no ha sido siempre como hoy en día la conocemos. A pesar de que desde el siglo XVIII se ha perseguido una definición que agrupe el conjunto de organismos y hábitats de la Tierra, fue hasta 1930 cuando se acuñó este término. En 1935 el botánico y ecólogo Arthur Tansley dio una definición más aproximada a la actual; aceptó que un ecosistema también albergaba en su definición las interacciones entre individuos de una comunidad y su medio. Si usted le pregunta a un historiador por qué las civilizaciones decaen, seguramente responderá que una de las causas más frecuentes es la incapacidad de las personas para alimentarse. Si se sitúan en un mapa las grandes ciudades antiguas, se puede observar que muchas de ellas se encontraban situadas en áreas intertropicales. La distribución geográfica

FIGURA 2. *Zona de Convergencia Intertropical*

parece que no es al azar, igualmente revela una hipótesis: la distribución geográfica de las ciudades que emergieron en el pasado jugó un papel muy importante en su abundante producción agrícola para satisfacer las necesidades de sus habitantes. La agricultura que se repite frecuentemente o que está muy localizada en un lugar ha sido la base de cada una de estas civilizaciones: el maíz para las civilizaciones precolombinas, el arroz en los pueblos asiáticos, trigo y cebada para las primeras ciudades del este y oeste. Este tipo de agricultura requiere una gran cantidad de agua, pero también de periodos secos, razón por la cual los climas tropicales y subtropicales ofrecen las mejores condiciones para su desarrollo, grandes lluvias en el verano y una temporada seca en el invierno. La máxima precipitación corresponde al pasaje de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), como se observa en la Figura 2, la cual es una banda climática estrecha que se extiende de este a oeste y migra en latitud durante el año, migración que ocurre entre los trópicos. El físico Vincent Boqueho, de la Universidad Paul Sabatier, en Francia, nos dice que las bajas temperaturas limitan el desarrollo de varios tipos de enfermedades de origen microbiano que transmiten los parásitos y, por el contrario, las altas temperaturas favorecen su desarrollo.

El clima más caluroso del siglo XXI crea un estrés mayor en los ecosistemas que además sufren de sobrepesca, insecticidas, agricultura intensiva, contaminación industrial y crecimiento de la población humana. Inevitablemente, las especies decaerán o desaparecerán, la biodiversidad continuará en caída libre y las interacciones delicadas que mantienen a los ecosistemas funcionando se romperán. La agricultura, por tanto, es una víctima y una causa del cambio climático. Veamos brevemente la historia de la civilización maya a manera de ejemplo de lo que hemos expuesto. La civilización maya se dividió en dos grandes porciones debido a que fueron estableciéndose según encontraban lugares adecuados para la agricultura. La primera parte de la población se fue ubicando en la Región Huasteca. El resto avanzó más y se ubicó en una zona que abarcaba en su totalidad los estados mexicanos de Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, así como parcialmente el estado de Chiapas. Asimismo, también ocupaba parcialmente los países de Guatemala, Honduras, Belice y El Salvador. Los historiadores identifican tres fases de su evolución: un periodo preclásico que se extiende desde el 2000 a. C. hasta el 250 d. C., un periodo clásico, en el cual la civilización alcanza su mayor esplendor entre el 250 y el 900 d. C.; y finalmente el periodo posclásico en el cual las grandes ciudades declinaron y fueron abandonadas, reagrupándose en pequeñas comunidades diseminadas por la zona. Durante el preclásico, los mayas se asentaron en pequeños villorrios y comenzaron a modificar el medio ambiente, limpiando la selva para poder sembrar maíz, que con el aumento de la densidad urbana se incrementó, con lo cual se aceleró la deforestación en el periodo clásico. Para los mayas la agricultura era exitosa cuando regresaba cada año el periodo de lluvias que, con la presencia de suficiente tierra, garantizaba una reserva de agua indispensable para la máxima explotación de la tierra cultivable. Existen evidencias de varios periodos de sequías que duraron desde varios años hasta décadas entre el 800 y el 900 d. C. Estos eventos climáticos se explican por una migración hacia el sur de la ZCI, que impidió el retorno de las lluvias veraneras al norte y a las zonas de irrigación de las tierras que cultivaban los mayas. Sin embargo, los mayas no fueron los únicos que sufrieron la desaparición de su civilización. La gran civilización del valle del Indo, localizada en lo que hoy es India y Paquistán, empezó a declinar alrededor del 1800 a. C. Las prácti-

FIGURA 3. Crecimiento poblacional proyectado



cas religiosas datan aproximadamente del 5500 a. C. y el esplendor de esta civilización se centra entre el 2500 y 2000 a. C., que tenía condiciones sociales comparables a los sumerios y a los egipcios. Los estudiosos ofrecen dos teorías que explican la desaparición, una de ellas debido a la invasión de una tribu indoeuropea (los arios), entre 1800 y 1500 a. C. La otra teoría sugiere que la desaparición fue el resultado de un cambio climático. Algunos expertos creen que se debió a la pérdida de agua del río Zarasai, mientras otros concluyen que fue una enorme inundación la que destruyó el área. Si volvemos al presente, se espera que la población mundial aumente en 2 000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 7 700 millones actuales a los 9 700 millones en 2050, pudiendo llegar a un pico de cerca de 11 000 millones para 2100 (ver la Figura 3), lo que provocará que los sistemas que soportan la vida se degraden desproporcionadamente porque casi en todos lados la gente se enfrenta a sistemas que no tienen una respuesta lineal, ya que el daño ambiental se incrementa a una tasa que se hace mayor con cada persona que se adiciona.

FIGURA 4. *Fórmula de la glucosa*

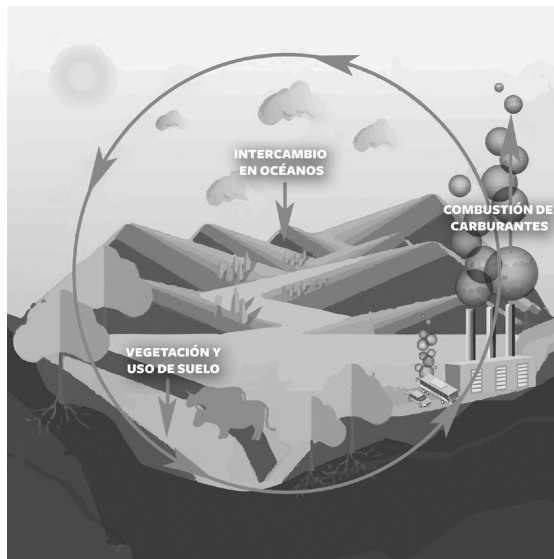
## Los ciclos del carbono

El carbono es omnipresente en el planeta, ya que constituye la materia fundamental de la vida a cualquier escala que se mire. Además, es polimorfo, como se constata analizando la estructura del grafito, los diamantes, diversos plásticos y combustibles, entre otros. También forma enlaces de formas esféricas y circulares, uniéndose con él mismo cuando la acción lo requiere. Sin él, no hay vida y tampoco energía disponible, puesto que cada uno de sus enlaces guarda la energía del Sol. Cada ser viviente, desde los microbios hasta las ballenas, algas y árboles, están compuestos de moléculas de carbono unidas entre sí y con otros elementos, formando los componentes fundamentales de la mayoría de las sustancias que se encuentran en los seres vivos. Por tanto, sin carbono no existiríamos, y la reacción química más importante que fundamenta las bases de la vida misma requiere sólo de tres elementos: carbono, en forma de  $\text{CO}_2$ , hidrógeno y oxígeno.

La ecuación presentada en la Figura 4 simplemente indica que seis moléculas de dióxido de carbono más 12 moléculas de agua en presencia de una fuente de energía como la luz solar (que a fin de cuentas es donde tarde o temprano toda la energía proviene) se transforman en una molécula de glucosa, seis de oxígeno e igual cantidad de agua. Lo que escapa de este proceso es el oxígeno y el agua. ¿Dónde se va la energía?, pues bien, a la molécula de glucosa. Éste es el proceso que siguen las plantas de las cuales nos alimentamos, por lo cual lo convierte en el proceso químico más importante del planeta, tanto por ser la fuente primaria de energía para todos los organismos como por el hecho de haber dado origen al petróleo, carbón y gas natural. Recuérdese que los alimentos contienen, en mayor o menor cantidad, proteínas, grasas, vitaminas, minerales y car-

bohidratos que son los compuestos que con mayor facilidad se convierten en glucosa dentro del cuerpo. La glucosa es una de las formas más simples de carbohidratos, también se le conoce como un azúcar simple, que no es igual al que se agrega a los alimentos. La vida continúa gracias a que las moléculas de carbono son constantemente empleadas y reutilizadas en dos ciclos biogeoquímicos separados, aunque relacionados entre sí: uno rápido, controlado por procesos biológicos, y el otro lento, determinado por las fuerzas tectónicas que dan forma a todo el planeta. De manera similar, así como los carbohidratos aportan energía a los seres vivos a partir de su oxidación controlada, los procesos de combustión aportan energía a través de la oxidación, produciéndose en ambos casos principalmente  $\text{CO}_2$ . Las moléculas son recicladas una y otra vez en diferentes partes del planeta, por ello este tipo de ciclos se conocen como biogeoquímicos en los cuales todas las moléculas que forman parte de los seres vivos son una parte del ciclo. Por otra parte, el carbono es el elemento dominante como energético formando la base de la hulla, el petróleo y el gas natural, todos ellos hidrocarburos que derivaron de las plantas que removieron el dióxido de carbono de la atmósfera cientos de millones de años atrás (ver la Figura 5). El desequilibrio de  $\text{CO}_2$  en el planeta es un asunto de escala temporal, en el

FIGURA 5. *Ciclo del carbono*





que cuenta cómo se libera al aire el almacenado en organismos y minerales, y cómo se integra nuevamente mediante su disolución, principalmente en el océano. Hoy día se sabe que el uso de la tierra en actividades agrícolas, en los bosques y en la urbanización de los terrenos ha traído como consecuencia la liberación exagerada de  $\text{CO}_2$  proveniente de suelo y plantas. La comprensión de lo que representa el ciclo de carbono es a la vez un reto intelectual y una urgencia para la sociedad, ya que los impactos de las actividades humanas que causan cambios al ciclo serán padecidos durante miles de años. Las observaciones directas y procesos que conduzcan al entendimiento del ciclo y de cómo es modificado, son necesarias para determinar las acciones que debemos tomar para responder a dichos cambios, así como las mejores estrategias para adaptar planes de mitigación y de adaptación relacionadas con la emisión del  $\text{CO}_2$ .

Se considera que las predicciones que realizan los investigadores para proyectar las concentraciones futuras de dióxido de carbono difieren mucho debido a las incertidumbres de lo que sucede en la atmósfera superficial y de los fenómenos de transporte en las interfaces aire-tierra-océano. ¿Cómo se pueden percibir esos cambios? ¿Qué les sucederá a las plantas una vez que se incremente la temperatura? ¿Serán menos productivas o bien removerán más carbono de la atmósfera del que liberan? ¿Cuánto carbono extra se incorporará a la atmósfera con la fusión de la capa de hielo permanentemente congelado en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías como es la tundra? ¿La circulación de las corrientes en los océanos al aumentar la temperatura cambiará la velocidad a la cual absorben el carbono? Como se observa existe mucha incertidumbre y no sabemos tampoco si la vida en los océanos será menos productiva y cuáles efectos se producirán por la acidificación de los mares.

## **El ciclo lento de carbono**

Al ciclo lento le toma de cientos a miles de millones de años mover el carbono entre la corteza terrestre, la atmósfera y los océanos. La litosfera está conformada por una corteza que puede alcanzar desde un metro hasta 100

kilómetros de profundidad. En esta capa los elementos que la conforman son básicamente piedra o rocas basálticas de gran espesor y muy rígidas. Las placas realizan movimientos laterales entre sí, colisionando y produciendo rugosidades en la corteza, dando origen a las cadenas de montañas. En las placas oceánicas ocurre lo mismo, pues la placa que está sumergida en el manto se disuelve, produciendo erupciones volcánicas. En el ciclo lento el dióxido de carbono se incorpora a la atmósfera por las erupciones volcánicas cuya cantidad anual no es muy grande, pero ha emergido de las profundidades del planeta por miles de millones de años, con lo cual la suma total es inmensa. Afortunadamente para la vida en el planeta existe el proceso natural de desgaste que remueve el dióxido de carbono más o menos con la misma rapidez que los volcanes lo producen. El desgaste es la descomposición de rocas, suelos y minerales a través del contacto con la atmósfera, la biota y las aguas de la Tierra. No debe confundirse con la erosión, que implica la alteración que se produce en la superficie de un cuerpo por la acción de agentes externos.

## El ciclo rápido de carbono

Este ciclo describe el movimiento del carbono a través de las formas vivientes del planeta que se ubican en la biósfera. Al ciclo rápido le toma desde segundos hasta siglos reciclar el carbono a través de los seres vivos, el suelo, los océanos y la atmósfera. El ciclo opera diariamente conforme los seres respiran y digieren los alimentos, con lo cual influyen cambios en donde se acumula el carbono. Los procesos claves del ciclo rápido son los siguientes:

- *Fotosíntesis*: consiste en la absorción del dióxido de carbono de la atmósfera por las plantas terrestres y marinas para producir estructuras orgánicas.
- *Respiración*: es la liberación del dióxido de carbono a la atmósfera, suelos y océanos por la exhalación del gas, llevado a cabo por los animales.

- *Digestión*: se refiere a la eliminación de compuestos de carbono por los animales terrestres y marinos una vez que se han alimentado de materiales ricos en carbono.
- *Descomposición*: es la desintegración de las estructuras de las plantas y animales por bacterias y la liberación de compuestos de carbono a la atmósfera, suelo y océanos. Cuando hay presencia de oxígeno en el proceso se libera dióxido de carbono, si está ausente, entonces se emite metano.
- *Combustión*: los incendios, alimentados por la vegetación, generan compuestos de carbono que son emitidos a la atmósfera.

## Distribución del CO<sub>2</sub> en la atmósfera

La estrecha conexión entre el clima y el carbono ha orillado a darle seguimiento en la atmósfera mediante mediciones satelitales. La utilización de satélites ubicados en la tropósfera media para observar la Tierra es uno de los puntos clave de la lucha contra el cambio climático, ya que permite obtener información real para comprender mejor el funcionamiento de la atmósfera y su relación con otros elementos del medio natural como pueden ser los océanos y la vegetación. El satélite tiene el objetivo de medir el dióxido de carbono proporcionando las imágenes más detalladas de las fuentes naturales y humanas del mismo. La expectativa es determinar la ubicación e identificar los sumideros naturales, para lo que se ha dotado al satélite de equipos que permiten detectar los procesos naturales del océano y de la tierra por los que el gas sale de la atmósfera y queda almacenado. Empleando esos datos, los investigadores integran un mapa de las concentraciones del CO<sub>2</sub> presentes en el planeta y observan cómo el gas se absorbe y emite y cómo se dispersa en la atmósfera. Los resultados obtenidos han refutado una creencia muy antigua de que el dióxido estaba homogéneamente distribuido y se dispersaba rápidamente en la atmósfera una vez que se elevaba desde la tierra a nivel de la tropósfera, incluso requiere de dos a tres años para homogenizarse. Qué tan bien y qué tan rápido se mezcla es importante para entender cuánto tiempo permanece en la atmósfera y cómo afecta al clima antes de que los sistemas naturales, como el océano,

FIGURA 6. *La combustión exotérmica*

lo absorban. Los análisis confirman que el dióxido no está bien mezclado. Por extensión, ese conocimiento es crucial para determinar qué debemos hacer para minimizar sus emisiones o emplear tecnologías que lo capturen y secuestren antes de que escape a la atmósfera. Las mediciones han aportado un dato muy importante: el hemisferio sur contiene mayores concentraciones de dióxido de carbono. La mayor parte de las emisiones generadas por el hombre proceden del hemisferio norte, donde están localizados los principales contaminadores del planeta como son los Estados Unidos, China y la India. De hecho, el hemisferio norte produce de tres a cuatro veces más dióxido de carbono del que se genera en el sur.

### **La combustión completa vs. la incompleta**

Todos los procesos químicos están acompañados por cambios en la energía. Cuando una reacción se lleva a cabo libera o absorbe energía, estos dos tipos de reacciones se denominan exotérmicas y endotérmicas, respectivamente. Un ejemplo simple de una reacción exotérmica es la combustión de la madera (ver la Figura 6). Para que la reacción se lleve a cabo

debe aportarse energía, por ejemplo, al encender un cerillo, con lo cual el material reacciona con el oxígeno del aire y produce calor, humo, cenizas,  $\text{CO}_2$ , agua y otros gases. Cuando un combustible completa totalmente la combustión libera la máxima cantidad de energía que contiene. Un ejemplo de combustión completa se lleva a cabo al consumirse una vela, la cual vaporiza la cera (un hidrocarburo) que a su vez reacciona con el oxígeno del aire para producir dióxido de carbono y agua. La fotosíntesis, por su parte, es un ejemplo de una reacción endotérmica, ya que en este proceso las plantas absorben la energía proveniente del Sol y convierten el dióxido de carbono y agua en glucosa y oxígeno. En general, las combustiones incompletas se llevan a cabo cuando no hay suficiente aporte de oxígeno o bien la disponibilidad del oxígeno no es homogénea en torno al combustible. En este caso, adicional al bióxido de carbono y agua, se forman productos como el monóxido de carbono (CO) y compuestos base carbón no quemado o parcialmente quemado. El CO es un compuesto industrial muy importante empleado como un agente reductor efectivo. Por ejemplo, cuando el CO se hace pasar sobre óxidos de hierro calientes éstos se reducen a hierro metálico, mientras que el CO se convierte en  $\text{CO}_2$ .

### **¿Qué evidencias existen del calentamiento?**

Los 20 años más calurosos que se han medido ocurrieron todos en los últimos 22 años. El promedio del nivel del mar se ha incrementado en 3.6 milímetros por año entre 2005 y 2015. La mayoría de estos incrementos se debe a que el agua caliente incrementa el volumen, aunque ahora el deshielo de los glaciares parece ser la principal razón para la elevación del nivel del mar. El efecto del calentamiento también se nota en la floración prematura de las plantas y los cambios de territorio de los animales. Los datos científicos sugieren que, de continuar el curso actual de explotación de los recursos, la civilización humana puede empezar, o ya empezó, a experimentar un colapso que se avecina en las siguientes décadas. Antes de adentrarnos en el tema del posible colapso de la civilización es pertinente definir algunos conceptos que se manejan cotidianamente:

1. *Cambio climático*: la Convención del Cambio Climático de las Naciones Unidas lo define como “un cambio en el clima que se atribuye directa o indirectamente a las actividades humanas y que altera la composición global de la atmósfera y que es adicional a la variabilidad natural del clima observada al compararse en periodos de tiempo parecidos”.
2. *Peligro*: se refiere a la aparición potencial de eventos físicos naturales o inducidos por el hombre o impactos físicos que causan la pérdida de la vida, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdida de las propiedades, infraestructura, ecosistemas, recursos ambientales.
3. *Vulnerabilidad*: la propensión o predisposición de ser afectado negativamente. La vulnerabilidad incluye una variedad de conceptos y elementos entre los que están la sensibilidad o susceptibilidad al daño, la falta de capacidad de superarlo o de adaptarse a él.
4. *Colapso*: se puede definir como una rápida y prolongada pérdida de la población, identidad y compleja situación socioeconómica. Los servicios públicos se derrumban, seguido de un desorden conforme el gobierno pierde el control y sobre el control de la violencia. Virtualmente, todas las civilizaciones han seguido este destino. En algunos casos se recuperan o transforman como, por ejemplo, los chinos o los egipcios, pero en otros casos el colapso es permanente. Hoy en día y por primera vez, la civilización en su totalidad, con una sociedad altamente tecnológica, que se encuentra cada vez más interconectada, es amenazada por un colapso debido a una serie de circunstancias de tipo ambiental. De los problemas más serios, que muestran una escalada rápida en su severidad, el cambio climático es sin duda uno de los más preocupantes. Pero existen otros elementos que pueden potencialmente contribuir al colapso: la extinción acelerada de especies animales y de plantas, que conducen a la pérdida de los servicios que proveen los ecosistemas, esenciales para la sobrevivencia humana, la degradación de la tierra y los cambios en el uso del suelo, la acidificación de los océanos, la presencia de compuestos tóxicos en diferentes ecosistemas; todo ello empeora algunos aspectos del medio ambiente en lo referente a la aparición de

enfermedades infecciosas, sin olvidar la sobreexplotación de los mantos acuíferos. Los problemas mencionados no están separados, más bien interactúan en dos gigantescos sistemas, el de la biósfera y el del sistema socioeconómico humano, y determinar cómo prevenir que generen un colapso global es tal vez el reto más importante al que se enfrenta la humanidad. Según Martin Palmer, un teólogo inglés en la historia se han sucedido —en el norte de Europa— cuatro grandes colapsos.

1. El primero alrededor del 3000 a. C., causado parcialmente por el cambio climático que provocó un gran aumento de temperatura al tiempo que se deforestaron las tierras de las planicies altas. Es decir que en el 3000 a. C. se había cambiado completamente el bosque y la naturaleza maderera que caracterizaba a Inglaterra, con lo cual un tercio de la población murió de hambre por el colapso de la agricultura.
2. El segundo gran colapso sucedió inicialmente por un desastre natural que fue la erupción del volcán Hekla en Islandia, alrededor de 1160 a. C., el cual arrojó dos kilómetros cúbicos de roca volcánica a la atmósfera que bloqueó la entrada de los rayos solares, desencadenando un periodo de congelación en el norte de Europa que duró muy probablemente una década, y simplemente toda la vegetación murió y con ella animales y humanos.
3. El tercer colapso fue la caída del Imperio romano porque no pudo alimentar más a sus tropas y por tanto no pudo proteger sus ciudades debido a una mala política agrícola, industrialización, destrucción de los bosques y erosión de los suelos.
4. El cuarto colapso fue desencadenado por la Peste Negra a mediados del siglo XIV, y acabó con la vida de probablemente un tercio a la mitad de la población mundial.

Hoy en día no todo mundo entiende que el progreso se ha desarrollado a expensas de comprometer el futuro, cree que el colapso será abrupto y amargo, pero otros afirman que los colapsos abruptos son un fenómeno históricamente raro. Cuando se comparan los colapsos de las civilizacio-

nes pasadas con lo que nos puede suceder hoy en día, se anota que la civilización industrial de hoy en día difiere mucho de las pasadas y hay cuatro ejemplos de dichas diferencias. Primera: la civilización actual depende de una fuente de energía excepcionalmente rica, no renovable e irremplazable: los combustibles fósiles. Las grandes metrópolis, la producción globalizada, la agricultura industrial y una población mundial de 8 000 millones la hace excepcional, pero no sustentable sin los combustibles fósiles. No existe un reemplazo realista de la energía que proveen los fósiles. Segunda: la enorme cantidad de energía que suplen los combustibles fósiles ha generado un crecimiento de los países enorme y con grandes ganancias en los últimos dos siglos. Pero en las décadas siguientes esa energía abundante que permite un crecimiento constante desaparecerá. Tercera: tener un sistema que deliberadamente promueve la aceleración del consumo por el bien del supuesto “crecimiento económico” es un verdadero genocidio. Las civilizaciones preindustriales empobrecieron los suelos, derribaron los bosques y contaminaron los ríos. Pero el daño causado fue temporal y geográficamente limitado. Una vez que los incentivos del mercado fueron impulsados por los combustibles fósiles para explotar la naturaleza, los resultados han sido terribles y abarcan todo el planeta. Cuarta: los humanos somos la especie más invasiva que se conoce. Aunque representamos 0.01% de la biomasa del planeta, 96% de los mamíferos son ganado y sólo 4% son mamíferos no domesticados. La capacidad colectiva de la civilización de enfrentar sus crisis crecientes se enfrenta a un sistema político antagónico y fragmentado entre las naciones en donde se desea más el poder económico que la gente y el planeta.

## **Sensibilidad y cambio climático**

Los humanos emiten dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera que generan el calentamiento extra que da origen a un clima más caluroso. Pero ¿cuánto aumenta el calor? Sabemos por los estudios geológicos que existe una estrecha relación entre el aumento de dióxido y el de la temperatura del planeta. Conforme la comprensión del efecto invernadero y la influencia en el clima ha crecido, se ha convertido en un



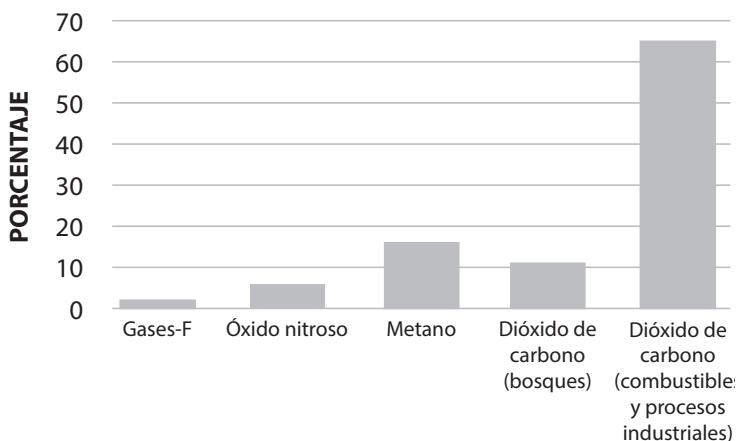
imperativo científico conocer la relación existente entre los gases de efecto invernadero y el calentamiento. ¿Cuánto más calienta la atmósfera una unidad de  $\text{CO}_2$ ? La relación entre el dióxido de carbono y el calentamiento se conoce como la “sensibilidad” del clima al  $\text{CO}_2$ . Determinar la sensibilidad climática nos ayuda a entender los riesgos futuros y a planear para adaptarnos a dichos cambios. El sistema climático se vuelve sumamente complicado conforme los humanos lo afectan. Para entender los procesos básicos es necesario simplificar el sistema y considerar dos diferentes medidas de sensibilidad. Estas medidas se llaman “respuesta climática transitoria” y “sensibilidad climática de equilibrio”. La primera es una medida de cuánto se calienta el clima cuando es producto de la actividad humana. La segunda medida muestra cuál será el resultado final al pasar cientos de años. En general, la respuesta climática transitoria se define por cuánto la temperatura promedio global se elevará si se aumenta el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera 1% cada año, el valor final se mide tomando como base el nivel preindustrial de 280 ppm y finaliza cuando éste se duplique. Debe tomarse en consideración que, al doblar la sensibilidad, no es en sí una proyección absoluta, los científicos no están diciendo que el aumento se dará de esa manera; más bien es una técnica simplificada por los científicos para entender cómo la temperatura pudiese responder a un aumento en los niveles de  $\text{CO}_2$ . El símil a esta medida es, por ejemplo, cuando sabemos cómo reacciona una persona a una dosis de medicamento podemos inferir qué puede pasar si le damos una dosis mayor. La “respuesta climática transitoria” sólo nos indica parte de la película, la cantidad de calentamiento esencialmente al instante en que la concentración de  $\text{CO}_2$  se ha duplicado. Sin embargo, diferentes partes del sistema climático se calientan a diferentes velocidades, por ejemplo, la atmósfera se calienta más rápidamente que los océanos. Note que los océanos cubren casi cuatro kilómetros de profundidad y más de tres cuartas partes de la superficie terrestre, por tanto, tomará largo tiempo en calentarse. Tómese en consideración que los océanos no están en equilibrio con la atmósfera y los modelos nos informan que las partes más profundas de los océanos incrementarán su temperatura por miles de años. Regresando a nuestra analogía médica, la respuesta a cuando se alcanza el equilibrio es equivalente a como se siente uno después de terminar completamente. En el siste-

ma climático esto puede tomar cientos, si no miles de años. La mejor guía para proyectar el calentamiento futuro es empleando la generación actual de modelos climáticos. Estos modelos indican que el calentamiento depende fuertemente de los niveles futuros de emisiones. Para un escenario de altas emisiones, el dióxido de carbono se incrementará más de 900 ppm para el año 2100, y los modelos proyectan para el final del siglo aumentos de temperatura entre 3.2 °C y 5.4 °C. Para un escenario de bajas emisiones en los que los niveles de dióxido de carbono rondan por las 420 ppm en la atmósfera, los modelos proyectan un calentamiento entre 0.9 °C y 2.3 °C para el 2100.

## Efecto invernadero y su relación con el CO<sub>2</sub>

Existe una clara evidencia de que los cambios climáticos son causados por el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de efecto invernadero, particularmente el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso aunados a los gases-F (ver la Figura 7). Si se comparan con el dióxido de carbono, la emisión a la atmósfera del metano y del óxido nitroso es notablemente menor, a pesar de ello tienen mayor impacto en términos

FIGURA 7. Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de gas



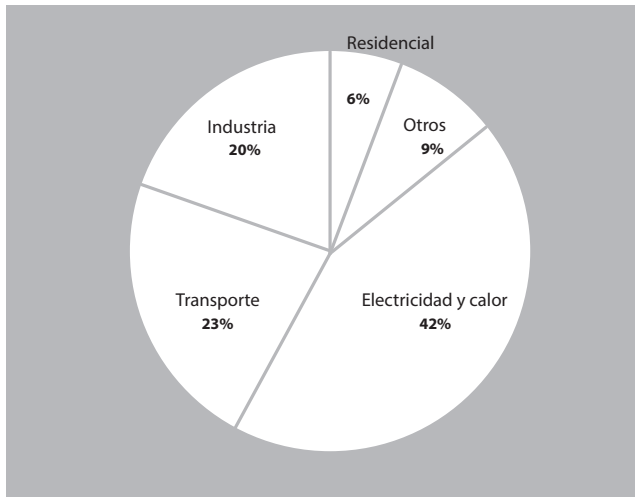
de calentamiento global. Los gases fluorados (F-gases) son una familia de compuestos sintéticos que se emplean en diversas aplicaciones industriales. Se han empleado para sustituir compuestos que degradan la capa de ozono, pues no reaccionan con él, pero son poderosos gases de efecto invernadero, 23 000 veces mayor que el del dióxido de carbono. Ahora bien, el gas de efecto invernadero más importante es el vapor de agua que representa 95% del total presente en la atmósfera y probablemente contribuye con 60% del calentamiento. El vapor de agua no controla la temperatura terrestre, más bien él es controlado por la temperatura. Esto se debe a que la temperatura de la atmósfera limita la cantidad de vapor que puede contener. Si hay una emisión extra de  $\text{CO}_2$  proveniente de la quema de los combustibles, esto incrementará la temperatura y agua adicional se evaporará de la tierra y los océanos, con lo cual la temperatura aumentará aún más ¿Cuánto amplifica el vapor de agua el calentamiento producido por el dióxido de carbono? Los estudios han mostrado que se puede amplificar el efecto del calentamiento al doble, de hecho, un cambio de  $1^\circ\text{C}$  generado por el  $\text{CO}_2$  genera un aumento de otro grado centígrado. Si bien el vapor de agua es el gas de mayor efecto invernadero, su permanencia en la atmósfera es corta, mientras que el  $\text{CO}_2$  es removido del aire por los procesos geológicos naturales, con lo cual permanece en la atmósfera por años y hasta siglos.

Las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera mayoritariamente son producidas por los combustibles empleados en los sectores de abastecimiento de energía (ver la Figura 8).

Veamos entonces algunas características de la contribución a la emisión de gases de efecto invernadero para los principales sectores de la producción.

## **Contribución del transporte**

El sector transporte es uno de los principales generadores de dióxido de carbono y las previsiones apuntan a que en breve será el sector que más contribuya al cambio climático. Como cabría esperarse, la intensidad del transporte de personas y mercancías es muy diferente según en qué par-

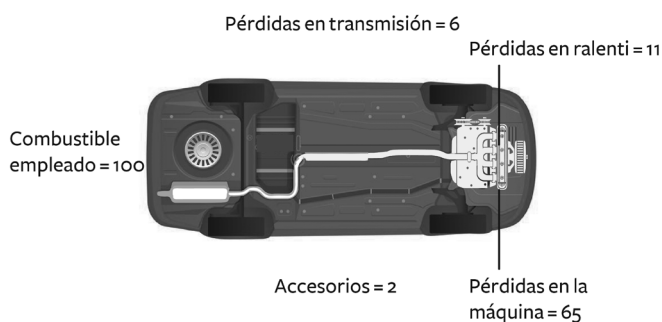
FIGURA 8. *Emisiones de dióxido de carbono por sector*

te del mundo nos fijemos. Así, sólo hay que recordar que en la Tierra hay unos 900 millones de automóviles y la mayor responsabilidad en las emisiones corresponde a los países desarrollados. En cuanto a los usuarios, en la medida que se dispone de más ingresos, se dedica un mayor presupuesto a viajes en medios más rápidos (y normalmente más emisores), y la distancia media de viaje aumenta progresivamente. Cerca de 90% del combustible empleado en la transportación está basado en el petróleo de donde provienen la gasolina y el diésel. La combustión de un litro de gasolina genera aproximadamente 2.3 kg de  $\text{CO}_2$  y un vehículo promedio emite 404 gramos del  $\text{CO}_2$  por km recorrido. En el ciclo de un automóvil de combustión interna la máquina convierte en trabajo efectivo de 15 a 30% de la energía contenida en el combustible (ver la Figura 9). El resto se pierde como calor y fricción, por lo que existe un interés de la industria automotriz en recuperar la energía perdida y emplearse en otras aplicaciones.

- Incrementar la eficiencia del sistema de transporte haciendo uso de tecnologías digitales, disminuir costos del transporte público y alentar el cambio a modos de transporte de bajas emisiones.

FIGURA 9. *Eficiencia de los motores de combustión interna*

Gran parte de la energía que se añade a un automóvil se emplea para hacerlo mover y permitir funcionar los accesorios. El resto se pierde por falta de eficiencia en la combustión, las pérdidas en ralentí y otras.



- Acelerar la disponibilidad de alternativas energéticas de bajas emisiones para el transporte, tales como biocombustibles avanzados, electricidad, empleo de hidrógeno y de combustibles sintéticos y promover la electrificación del transporte.
- Dirigir la investigación y desarrollo para producir vehículos de cero emisiones.

## Contribución por la producción de electricidad

Los generadores eléctricos que operan hoy en día convirtiendo la energía cinética (mecánica) en eléctrica producen casi toda la electricidad que emplea un consumidor. Encender una lámpara, conectar el cargador del teléfono móvil e incluso abrir la llave del agua caliente son actos que realizamos de manera tan frecuente que apenas recapacitamos en ellos ni en el consumo eléctrico que implican y mucho menos en su repercusión medioambiental. Dependiendo del tipo de energía primaria utilizada para producir energía eléctrica, podemos clasificar las centrales generadoras de electricidad en:

- Termoeléctricas: utilizan el calor que se desprende de la quema de combustibles fósiles, por ejemplo, petróleo, carbón y gas natural.

- Hidroeléctricas: para generar la electricidad emplean la energía potencial del agua almacenada en los embalses.
- Eólicas: la energía eólica aprovecha el viento para obtener energía mecánica mediante el movimiento de las aspas de los molinos eólicos.
- Fotovoltaicas: utiliza la radiación solar captada a través de placas solares.
- Mareomotriz: la electricidad se genera aprovechando el movimiento de las mareas.

Aproximadamente 63% de la electricidad generada en los países desarrollados proviene de la quema de combustibles fósiles, principalmente carbón, coque y gas natural, pero que trabajan con eficiencias entre 30 y 50%. El carbón es el centro del debate dentro de las políticas energéticas en los países.

## Contribución de la industria

Por regla general, hasta ahora, la política seguida contra la contaminación industrial ha sido la de los métodos correctivos con la aplicación de tecnologías como el filtrado de humos y gases, la depuración de vertidos o el confinamiento en depósitos de seguridad de los residuos tóxicos. Este tipo de métodos no eliminan la contaminación, la trasladan de un medio a otro: los lodos y residuos de la depuración o filtrados han de depositarse en algún lugar. La industria en total genera el consumo de 25% de la energía disponible y produce 20% de las emisiones globales de dióxido de carbono. Los sectores industriales importantes en la contribución de CO<sub>2</sub> son el de fabricación de cemento, acero y la industria química. Si la industria del cemento fuera un país, sería el tercer emisor más grande del mundo. Esta industria emite a la atmósfera más CO<sub>2</sub> que el combustible de aviación (2.5%) y no está muy lejos de la que emite la industria agrícola (12%). Las construcciones urbanas utilizan el cemento a gran escala, por lo que su producción contribuye en un 8% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> debido a las grandes cantidades de combustibles fósiles que se emplean durante los procesos de manufactura.

## Contribución del sector comercial y residencial

En el siglo xx la población urbana mundial pasó de unos 250 millones de personas en áreas urbanas en 1900, con unas 10 metrópolis millonarias, a unos 3 000 millones de personas en núcleos urbano-metropolitanos a finales de siglo, en donde la primacía de las metrópolis millonarias, bastante más de 400, era incontestable. Hoy día se calcula que 52% de la población vive en zonas urbanas y se prevé que aumente hasta 68% en el año 2050. Mundialmente los edificios representan alrededor de 10% de las emisiones directas de CO<sub>2</sub>, aunque al incluir las emisiones del uso de electricidad se incrementa esta proporción hasta 30%. Las ciudades en desarrollo generan problemas ambientales relacionados con la energía, debido a la concentración de población y a las actividades económicas. La mayoría de las economías urbanas son usuarias intensivas de energía (ver la Figura 10). En el nivel doméstico, en algunos casos, el consumo de energía es más alto que

FIGURA 10. *Central térmica de generación de energía*



en las áreas rurales principalmente por mayor incorporación de electrodomésticos y un uso más intensivo de los mismos.

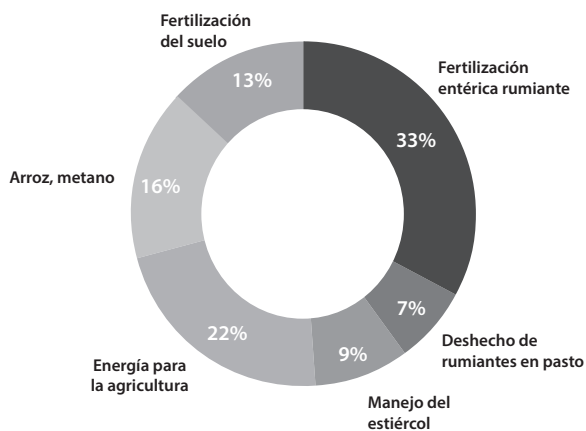
## Contribución del sector agrícola

Los sistemas ecológicos de la Tierra, por medio de los cuales el carbono queda retenido en la biomasa viva, en la materia orgánica en descomposición y en el suelo, desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono mundial. El carbono es intercambiado de manera natural entre estos sistemas y la atmósfera mediante los procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición. En el suelo el  $\text{CO}_2$  se produce fundamentalmente a través del metabolismo de los microorganismos y de las raíces de las plantas, siendo la descomposición microbiana de compuestos orgánicos el proceso más importante que lo genera. Durante la descomposición una parte del carbono es devuelto a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$ , mientras que otro se transforma en compuestos más sencillos o se almacena en las propias estructuras microbianas. Se considera que la agricultura contribuye con 56% de los gases de efecto invernadero diferentes del dióxido de carbono. El empleo de combustibles fósiles en las actividades agrícolas tales como el uso de tractores, bombas de irrigación, etc., añaden anualmente de 0.4 a 0.6 Gt  $\text{CO}_2$ . La principal fuente agrícola de gases de efecto invernadero se debe a la fermentación entérica de los animales rumiantes, la cual genera gran cantidad de las emisiones totales, seguida del cultivo del arroz, del estiércol depositado en el pasto y del empleo de fertilizantes sintéticos (ver la Figura 11).

## La contribución de los humanos

En un día una persona respira en promedio unos 500 litros de  $\text{CO}_2$ , que en masa equivale aproximadamente a un kilogramo. Diríamos que esa cantidad no representa mucho hasta que nos damos cuenta de que la población mundial se aproxima a los 7 000 millones de seres, y para el año 2025 será de 8 500 millones, los cuales colectivamente producen 26.4 Gt de  $\text{CO}_2$  por



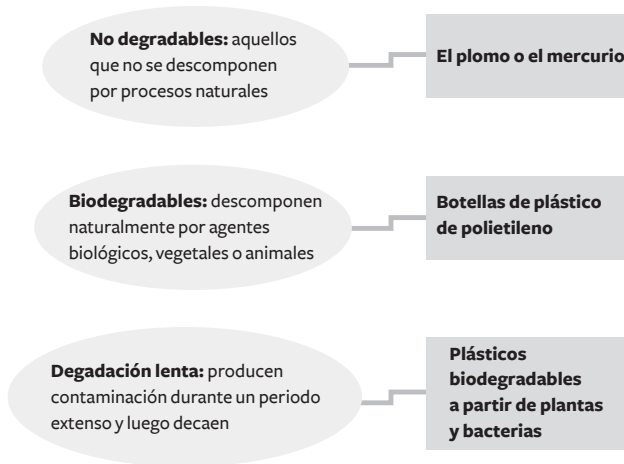
FIGURA 11. *Emisiones provocadas por la agricultura*

año, que representa alrededor de 7% de las toneladas emitidas por la quema de combustibles fósiles en el mundo. Lo anterior conduce a afirmar que los humanos son contribuyentes significativos del calentamiento global, pero algunos piensan que el dióxido de carbono que se exhala es parte de un ciclo natural por el cual el cuerpo convierte los carbohidratos de las plantas que absorben dióxido y nos proveen de energía, más agua y  $\text{CO}_2$ . Por lo tanto, desde esa perspectiva no estamos añadiendo más  $\text{CO}_2$ . A diferencia de los procesos de combustión, el cuerpo humano utiliza carbohidratos, por lo que en el proceso respiratorio la exhalación (con contenidos del orden de 4% de  $\text{CO}_2$ ) no libera el carbono almacenado durante millones de años en el petróleo, sino el carbono procedente del  $\text{CO}_2$  recientemente acumulado por el crecimiento de tallos, frutos y legumbres. Desafortunadamente hay que considerar que se emite más  $\text{CO}_2$  fuera del ciclo natural del carbono y que la tierra y los océanos son incapaces de absorber todo el dióxido extra que se emite (ver la Figura 12).

## Los impactos en los océanos

Algo de historia sobre el nivel del mar nos dice que hace unos 26 500 años fue el pico glacial más reciente, tiempo en el cual unos 26 millones de ki-

FIGURA 12. Contaminación producida por las actividades humanas



lómetros cuadrados de hielo cubrían la Tierra. Globalmente el clima era más frío y seco, la lluvia escasa, aunque cúmulos de bosques lluviosos sobrevivían en los trópicos. Con tanta agua del planeta incorporada en los hielos, el nivel del mar era unos 120 metros más bajo de lo que es hoy en día. En los últimos 20 000 años, el nivel del mar ha aumentado unos 120 metros. Conforme el clima ha sido más caluroso como parte del ciclo natural, parte del hielo se descongeló y los glaciares retrocedieron al punto en el cual sólo en los polos y en los picos de las montañas se encuentra hielo. Después de esa época el nivel del mar se elevó a velocidades mayores a tres metros por siglo y continuó haciéndolo hasta hace unos 7 000 años, tiempo en el cual el clima se estabilizó y el nivel del mar disminuyó su velocidad de crecimiento manteniéndose estable por unos 2 000 años. Hoy en día el nivel del mar ha empezado a elevarse más rápido que en los últimos 6 000 años, los datos que se poseen concuerdan en que la elevación se inició alrededor de 1850 cuando se empezó a emplear el carbón para mover los trenes de vapor, y no ha parado de hacerlo. Las emisiones han provocado que la temperatura de la superficie haya aumentado y que los océanos absorbieran 80% de este calor adicional. En 2016 se estimaba que la elevación era de unos 3.4 mm por año, y se espera que crecerá mucho más al final del siglo, para entonces se estima que se elevará entre 0.3

y 1 metro para el año 2100. Eventualmente, la elevación será de 2.3 metros por cada grado centígrado de aumento de la temperatura. Conforme el planeta se calienta, el nivel del mar se eleva por dos razones. La primera es debido al deshielo de los glaciares y de los casquetes polares. Las altas y persistentes temperaturas registradas recientemente a causa del calentamiento global son las responsables de que la cantidad de hielo que se derrite en verano haya aumentado y de que las nevadas hayan disminuido debido a que los inviernos se retrasan y las primaveras se adelantan. Este desequilibrio genera un aumento neto significativo de la escorrentía frente a la evaporación de los océanos, provocando que el nivel del mar se eleve. La segunda, es debido a la dilatación térmica, ya que el agua al calentarse ocupa más espacio que cuando está fría. Por tanto, los océanos al calentarse por el cambio climático se expanden para llenar un volumen mayor; este fenómeno es el responsable de un tercio de la elevación del nivel del mar. Cuando el nivel del mar se eleva con rapidez, tal y como ha estado haciéndolo en los últimos tiempos, incluso un pequeño aumento puede tener consecuencias devastadoras en los hábitats costeros. Las capas de hielo y los glaciares en Groenlandia y la Antártica se funden de tres maneras: por la parte superior debido al aire caliente, por los lados debido al romperse y caer al mar, y por abajo debido al calentamiento del agua del océano donde el hielo se extiende sobre el mar. A causa de lo anterior, la velocidad a la que el hielo se funde varía de lugar a lugar, conforme las condiciones cambian. Este proceso se ve negativamente influido por la filtración de agua dulce de la superficie, que actúa como lubricante para las corrientes de hielo y ayuda a que éstas se deslicen con mayor rapidez. Es decir, el agua dulce filtrada hasta la base de las placas de hielo las derrite, debilita y desliza hacia al mar. El nivel de altura de los océanos es la del promedio de su superficie de todo el mundo y es esta medida la que se discute en las noticias. Históricamente ha sido muy retador medir dicha altura, puesto que la superficie del océano no es plana, cambia diariamente y hasta en el curso de unas cuantas horas, debido a los vientos, mareas y corrientes. Hasta 1993 se estimaba con medidores que registraban la altura del nivel del agua, comparada con un punto estable de referencia colocado en tierra. Hoy en día la medición se realiza con satélites que usan radares precisos que recogen señales continuamente de la altura de los océanos.

El agua de mar penetra en zonas cada vez más alejadas de la costa, lo cual puede generar consecuencias catastróficas como la erosión, la inundación de humedales, la contaminación de acuíferos y de suelo agrícola, y la pérdida del hábitat de peces, pájaros y plantas. Además, entre 470 y 760 millones de personas viven en zonas que cada vez serán más vulnerables al riesgo de inundaciones. La elevación del nivel del mar les obligará a abandonar sus hogares y a mudarse a otra zona. Las islas de poca altitud quedarían completamente sumergidas. La elevación del nivel del mar no es sólo un problema de agua, también lo es de sal. Imagine lo que sucedería si el agua salada inunda un campo de cultivo o un bosque costero. El área tendrá que sobrevivir no sólo a la inundación, también a la saturación de agua salada que puede matar a las plantas y alterar irreversiblemente la química del suelo. Un estudio del kril antártico realizado en el océano del sur indica que las especies presentes colapsarán si el dióxido de carbono sigue aumentando. *Kril* es un término empleado para describir alrededor de 85 especies de crustáceos que son el recurso pesquero más abundante y también la fuente primaria de alimentación de los principales depredadores como las ballenas, focas y pingüinos. Se estima que hoy en día hay unos 500 millones de toneladas del kril en los océanos del Sur y la biomasa de estas especies puede ser mayor que cualquier otra especie animal multicelular existente en el planeta, lo que le confiere al kril un papel fundamental en el secuestro de carbono de la atmósfera hacia el fondo marino.

## ¿Cómo adaptarse a los impactos de los océanos?

En Nueva York se están planeando muros de protección con un costo elevadísimo. Cómo y dónde deberían levantarse ya es motivo de acaloradas discusiones. Según las estimaciones del Grupo de Expertos por el Cambio Climático en 2050, 1 000 millones de personas vivirán en litorales llanos. Al final, la protección costera o la protección contra inundaciones responderá a un cálculo de costo/beneficio. Si los costos continúan aumentando con la subida del nivel del mar habrá que preguntarse si todavía tiene sentido proteger ciertas zonas o si es mejor renunciar a ellas. Como

consecuencia de todo esto, una nueva rama de la ciencia ha hecho aparición: adaptación de la sociedad al aumento del nivel del mar. Gran Bretaña, su país de origen, ya ha decidido que algunas regiones no invertirán más en proteger sus costas. El plan de gestión costera contempla abandonar todas las medidas de protección de más de 500 km de costa en los próximos 50 a 100 años. Como resultado, unos municipios deberán ser reubicados en el interior. Cuantos más recursos tenga una sociedad más fácil le resultará protegerse y en caso extremo financiar su reubicación. Las sociedades más pobres se verán mucho más afectadas por el aumento del nivel del mar. En Alemania, tres millones de personas que viven en el norte del país se verían afectadas por el aumento de los mares. Los ingenieros de costas en Alemania han desarrollado un dique de contención que puede hacer frente a los pronósticos más pesimistas y que además se puede elevar. El dique ahora es capaz de soportar un aumento de 50 cm del nivel del mar durante los próximos 100 años. Si el nivel sube más de estos 50 cm habrá que sumar más capas de tierra. El dique podría hacer frente a una subida adicional de hasta 1.5 m del nivel del mar. Pero ¿basta con añadir nuevas capas de sedimentos? ¿Cuánto tiempo servirán estas medidas de protección? ¿No estamos con ello retrasando simplemente lo inevitable? Las medidas de protección permiten sobre todo ganar tiempo. No hay protección que dure para siempre. Si se construye un dique, por ejemplo, la próxima generación tendrá que decidir, en unos 50 años, si reforzarlo o abandonar esa tierra finalmente al mar. El horizonte temporal de pronóstico para las medidas de protección resultantes generalmente tiene al año 2100 en mente. Pero los océanos no entienden de horizontes temporales. Continuarán subiendo después y cambiarán el mapa mundial. No teniendo medidas de protección, tendremos que renunciar a ciudades enteras. Necesitaremos de nuevos conceptos para la vida en las costas. Del mismo modo que recordamos a los griegos como civilización, como cultura que nos legó la democracia. En 2000 años nosotros seremos recordados como los responsables del aumento del nivel del mar. Depende de nosotros si la capa de hielo en Groenlandia y en la Antártida colapsan finalmente con el progresivo calentamiento de nuestro planeta, pues ya se ha emprendido irremediablemente ese rumbo. Lo que realmente está ahora en nuestras manos es cuán rápido será el proce-

so y hasta donde llegará. Porque si no hacemos nada para proteger el clima y seguimos por este camino, a finales de siglo podríamos alcanzar un calentamiento de 5 °C y esto se traducirá en un aumento del nivel del mar de más de 10 metros.

## **Impacto por cambios en el uso del suelo**

Se definen los cambios del uso del suelo como las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por las actividades humanas que modifican la manera en que el suelo es usado (por ejemplo, deforestando o modificando el sistema agrícola), o bien tienen un efecto en la cantidad de biomasa existente. El cambio en el uso del suelo constituye uno de los factores primordiales en el cambio climático global, ya que altera ciclos biogeoquímicos como el del agua o el del carbono. No se debe olvidar que a través de los cambios en el uso del suelo se materializa nuestra relación con el medio ambiente. La deforestación y la degradación de los bosques son causa y resultado del cambio climático. Los bosques absorben CO<sub>2</sub> actuando como un sumidero, pero cuando se deterioran o destruyen se convierten en una fuente liberando CO<sub>2</sub> a la atmósfera. La mayoría (casi 70%) de las emisiones de CO<sub>2</sub> en las selvas tropicales de América, Asia y África están vinculadas a la degradación de estas últimas. “Este descubrimiento es un llamado de atención al mundo para que cuide sus selvas tropicales”, dicen los investigadores del Woods Hole Research Center. “Si queremos evitar que las temperaturas globales alcancen niveles peligrosos debemos reducir de manera drástica las emisiones e incrementar la capacidad de las selvas de absorber y almacenar dióxido de carbono”, agregaron. La mayoría de la deforestación —alrededor de 60%— tuvo lugar en América Latina (donde está la región amazónica), 24% en África y 16% en Asia.

## **Impacto por la degradación del suelo**

El suelo se degrada por el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, causadas por procesos físicos, químicos

y/o biológicos. La degradación provoca alteraciones en el nivel de fertilidad y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva. Las razones por las cuales dichos fenómenos suceden son debidas al uso y manejo inadecuado del suelo y por la acción de la erosión acelerada. La erosión del suelo contribuye a incrementar los gases de efecto invernadero debido a la reducción en la fijación del carbono. Globalmente, cerca de 55% de la desertificación de la tierra es causada por la degradación del suelo a causa de las actividades humanas (ver la Figura 13). Los futuros cambios climáticos afectarán la extensión, frecuencia y magnitud de la erosión del suelo, principalmente por los cambios en el ciclo de lluvia y temperaturas que impactan a la biomasa. La Organización de las Naciones Unidas calcula que en los próximos 10 años 50 millones de personas que habitan en tierras áridas serán desplazadas a causa de la desertificación. La contaminación por nutrientes es otro de los problemas ambientales más extendidos, costosos y complejos, y es el resultado del exceso de nitrógeno y fósforo en el aire y en el agua. El nitrógeno y el fósforo ayudan al crecimiento de algas

FIGURA 13. *Áreas de desertificación en el planeta. El desierto de Atacama*



y plantas acuáticas que brindan comida y un hábitat a peces, moluscos y organismos más pequeños que viven en el agua. La presencia de fósforo en aguas continentales superficiales es el factor responsable de los procesos de eutrofización. La eutrofización es el enriquecimiento excesivo de nutrientes en las aguas superficiales que da lugar a una proliferación de algas y plantas acuáticas, que a su vez lleva consigo una pérdida de transparencia del agua y disminución de la luz que llega a las capas situadas bajo la superficie de ésta. La biodiversidad aumenta la capacidad de los ecosistemas para absorber CO<sub>2</sub> y es un factor importante para la regulación de la forma en la que los ecosistemas pueden responder a los niveles crecientes de dióxido de carbono en la atmósfera. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, “la biodiversidad sostiene la vida en la Tierra y se refiere a la variedad que contiene la biota, desde la constitución genética de vegetales y animales hasta la diversidad cultural”. Debe tomarse en cuenta que, a escala planetaria, la biodiversidad tiene un papel destacado al limitar los impactos causados por cambios en otros sistemas de la Tierra. Al transformar selvas, bosques, matorrales, pastizales, manglares, lagunas y arrecifes en campos agrícolas, ganaderos, granjas camaroneras, presas, carreteras y zonas urbanas se destruye el hábitat de miles de especies.

## **Impacto por la pérdida de biodiversidad**

Además de perder cantidad neta de hábitat natural, los procesos de cambio de uso de suelo forman fragmentos de hábitat de diferentes tamaños y distancia 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 principal, 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 aquellas usadas para alimento. Los humanos se revelan como una especie simultáneamente insignificante y al mismo tiempo dominante en el gran esquema de la vida en la



Tierra. Los humanos representan sólo 0.01% de todos los seres vivientes, aunque desde el inicio de la civilización han causado la pérdida de 83% de todos los mamíferos y la mitad de las plantas. Las bacterias, de hecho, representan la forma viviente mayoritaria, 13% del total, pero las plantas superan a todos, pues representan 82% de toda la materia viviente. Todas las otras creaturas, desde los insectos hasta los hongos, peces y animales, conforman sólo 5% de la biomasa del mundo. Se cree que aproximadamente la mitad de los animales de la Tierra se han perdido en los últimos 50 años.

## **Metano, otro importante gas de efecto invernadero**

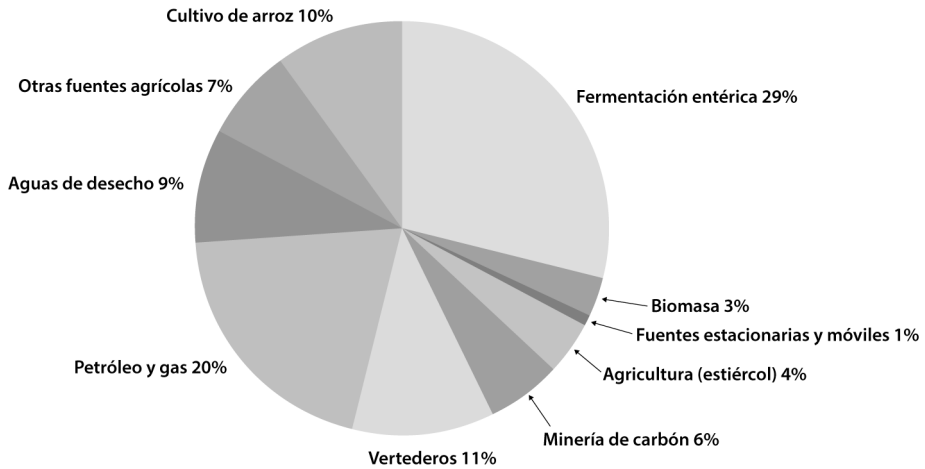
La molécula de metano consta de un átomo de carbono con cuatro átomos de hidrógeno unidos a él. Los estudios realizados retrospectivamente hasta hoy en día sugieren que en el año 2012 hubo una emisión de 172 Tg de metano por año proveniente de los humedales naturales, 30% del total global del gas, estimado en 568 Tg por año. Un teragramo (Tg) equivale a un millón de toneladas métricas. Se estima entre 25 y 100 Tg por año de metano proveniente de la biomasa boreal y de la tundra. Si bien el metano no permanece tanto tiempo en la atmósfera como el dióxido de carbono, inicialmente es más devastador para el clima debido a su eficiencia en absorber calor. Los científicos atribuyen un sexto del actual calentamiento global a las emisiones de metano, lo que le falta al metano de volumen, lo tiene de potencia. El permafrost es común en el hemisferio norte, prácticamente cubre un cuarto de la Tierra, es decir unos 37 millones de kilómetros cuadrados. Los científicos piensan que debe haber cinco veces más carbono que el emitido por el hombre desde 1850. Lo anterior es preocupante para quien estudia el calentamiento global, ya que conforme el mundo se calienta, el permafrost se fractura, con lo cual se incrementa la actividad microbiana. La ruptura también provee de vías para que el metano confinado por cientos de años migre a la atmósfera, aunque hasta este momento los científicos no han encontrado evidencias de que esté sucediendo. Existe otra vasta fuente de metano confinada en el planeta. En las profundidades frías del océano, el gas natural y el agua pueden mezclarse

formando una estructura parecida al hielo que se conoce como clatratos o hidratos de gas. Estos depósitos se encuentran en todo el planeta, sobre todo en los límites de los continentes, ya que los depósitos solamente ocurren bajo ciertas condiciones de temperatura y presión. Las cantidades son enormes, algunos piensan inclusive que la energía acumulada en esos depósitos es mayor que todas las fuentes de combustibles fósiles conocidos. Estos hidratos se encuentran depositados en aguas profundas, enterrados por capas de sedimentos por lo que, si el calentamiento global continúa por siglos, es poco probable que tenga efecto en ellos.

## Principales fuentes emisoras de gas metano

La mayor fuente de emisiones industriales del metano está vinculada con la industria del gas y del petróleo. Se emite durante operaciones normales de extracción de petróleo, gas natural o carbono. También durante la manipulación, procesamiento y transporte (ya sea en camiones o a través de tuberías) del combustible fósil. La combustión (incendios) de biomasa en bosques tropicales y sabanas también lo genera. Algunos animales de granja emiten metano de dos formas diferentes. Vacas, ovejas y cabras son ejemplos de animales rumiantes que durante su proceso natural de digestión crean grandes cantidades de metano. Lo que se conoce como fermentación entérica ocurre en el estómago de estos animales y es la causa de emisiones. La segunda forma es a través de la descomposición del estiércol del ganado (ver la Figura 14).

Las previsiones indican que, entre el 2005 y el 2020, las emisiones de gases de efecto invernadero en el cultivo de arroz podrían aumentar 16%, por lo que es necesario poder encontrar sinergias entre las medidas de adaptación al cambio climático y su mitigación para reducirlas, pero sin afectar a la producción. Y esto es particularmente importante si tenemos en cuenta que el arroz es el alimento básico para más de la mitad de una población mundial en constante aumento. A grandes rasgos, la generación de metano por los campos de arroz se produce cuando se inundan de agua. Esta lámina de agua impide que el oxígeno llegue al suelo, un suelo que dispone de materia orgánica que queda a disposición de bacterias que

FIGURA 14. *Emisiones de metano por fuente*

son anaeróbicas y que, fruto de su metabolismo, al utilizar esta materia orgánica generan metano. Por tanto, el metano no lo genera la planta de arroz, sino las condiciones de inundación que se dan en el suelo. El único papel que tiene la planta en el ciclo del metano en los campos es la de conducir este gas desde el suelo donde se produce hasta la superficie y, por tanto, a la atmósfera. Un kilogramo de arroz corresponde a la emisión de 100 gramos de metano. Asimismo, tanto el estiércol como los vertederos y la basura al aire libre están llenos de materia orgánica (restos de comida, periódicos, pasto y hojas). La basura nueva se apila sobre la que ya estaba y la materia orgánica se descompone en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno) y así se producen grandes cantidades de metano. Las investigaciones sobre el metano se han enfocado básicamente en los suelos, y resulta que los árboles son fuente importante en la emisión y confinamiento del metano. Los árboles vivos o muertos transportan y emiten metano producido en los suelos, así como emiten el gas producido dentro del árbol por los microorganismos.

## **El óxido nitroso, otro villano del efecto del calentamiento global**

Los humanos continúan transformando el ciclo global del nitrógeno a un ritmo muy acelerado, lo que es una consecuencia de la combustión de fósiles, una creciente demanda de nitrógeno en la agricultura y la industria y un uso ineficiente en su uso. Gran parte del nitrógeno antropogénico se pierde en el aire, agua y tierra, causando una cascada de problemas ambientales y de salud. Al mismo tiempo, la producción de alimentos en algunas partes del mundo es deficiente en nitrógeno, lo que destaca las desigualdades y la distribución de los fertilizantes que contienen nitrógeno. Se requiere una estrategia interdisciplinaria para minimizar las consecuencias negativas que genera el aumento de desechos que contienen nitrógeno. La mayoría del óxido nitroso proviene de la agricultura, incluyendo microbios en suelos fertilizados y estiércol animal. El óxido es un gas de efecto invernadero 300 veces más potente que el dióxido de carbono, y también destruye la capa de ozono que nos protege de las radiaciones provenientes del Sol. Por años los expertos han advertido de los riesgos del óxido nitroso, pero ha habido poca actividad para enfrentar el problema, pues está íntimamente ligado a los alimentos. Su tiempo de vida es relativamente corto, de ahí que el reducirlo podría tener un impacto significativo en el calentamiento global, pero, como hemos mencionado, la fuente principal del óxido nitroso es la agricultura, y uno podría pensar en limitar el dióxido de carbono o el metano, pero el óxido nitroso es un asunto de si comemos o no. La revolución verde es la denominación usada para describir el importante incremento de la productividad agrícola y, por tanto, de alimentos entre 1960 y 1980 en los Estados Unidos, la cual después se extendió a otros países. La revolución verde consistió en la siembra de variedades mejoradas de maíz, trigo y otros granos, cultivando una sola especie en un terreno durante todo el año, siembra de variedades mejoradas de maíz, trigo y otros granos aplicando grandes cantidades de agua, fertilizantes y plaguicidas. Con estas variedades y procedimientos se percibe que la producción es mayor a la obtenida con las técnicas y variedades tradicionales de cultivo. No obstante, ambas técnicas pueden ser

igualmente eficientes con un buen manejo, y esta revolución trajo consigo el deterioro de la vida en el suelo de los campos. A pesar de los esfuerzos por desacelerar el crecimiento demográfico a nivel mundial, la población humana sigue aumentando, y crece también la presión sobre la tierra agrícola existente. La superficie disponible para una expansión agrícola idónea se reduce en todos los continentes. No obstante, en África y América Latina quedan todavía grandes superficies que podrían dedicarse a la agricultura. Los elevados costos que ello tendría para la población autóctona que vive en los bosques, así como para la diversidad biológica y la vegetación forestal y de la sabana han disuadido a muchos gobiernos de aplicar esa estrategia.

### **¿Quién es el óxido nitroso?**

Como cualquier otro gas de efecto invernadero absorbe radiación y atrapa calor en la atmósfera, donde puede permanecer en promedio unos 114 años. Comparado con el dióxido de carbono, el óxido nitroso tiene relativamente corta vida, pero puede permanecer más tiempo que otros contaminantes climáticos como el carbono negro (que existe en la atmósfera sólo unos días). Un segundo inconveniente en su contra es que cuando se encuentra en la estratosfera expuesto a la luz y al oxígeno se convierte en una variedad diferente de óxidos que dañan la capa de ozono de la que dependemos para impedir que la radiación ultravioleta llegue a la superficie terrestre. Para dar una idea de su peligrosidad, un kilo de óxido nitroso calienta la atmósfera unas 300 veces más que un kilo de dióxido de carbono durante una escala de tiempo de 100 años.

### **¿En dónde se produce el óxido nitroso?**

Las bacterias producen este gas de forma natural. Cerca de 40% del óxido proviene de actividades humanas y la mayoría es resultado de la forma en que usamos el suelo, particularmente la agricultura. En las grandes parcelas de cultivo el estiércol del ganado presenta dos grandes problemas de

emisiones: por una parte, emite grandes cantidades de metano, pero también genera óxido nitroso, y cuando el estiércol no tiene acceso al oxígeno, produce el óxido. Cuando los granjeros añaden fertilizantes nitrogenados para estimular el crecimiento, aproximadamente sólo la mitad es tomada por las plantas, el resto es lavada por el agua subterránea o gasificada a la atmósfera. La emisión de gases de combustión también genera la producción del óxido, así como la producción de ácido nítrico o adípico (para la producción del *nylon* y otros productos sintéticos). Por su inercia química y naturaleza no tóxica es usado en el envasado a presión de productos alimenticios y como propelente en aerosoles. Se usa también como agente de detección de fugas en recintos bajo vacío o presurizados, en laboratorios (espectrometría), como agente de reacción en la fabricación de varios compuestos orgánicos e inorgánicos y como refrigerante en forma gaseosa o líquida para congelación por inmersión de productos alimenticios.

## ¿Qué pasa si la temperatura aumenta 0.5 °C de más?

Hoy en día una preocupación es lo que sucederá si la temperatura alcanza 2 °C de más. Aparentemente 0.5 °C de más no suena muy alarmante, aunque los impactos proyectados por los científicos son bastante dramáticos dado que según sus cálculos miles de millones de personas en el mundo se verán afectados por grandes ondas de calor, escasez de agua, inundación de ciudades situadas en la costa, por mencionar algunos, de los cuales describiremos con un poco más de detalle. Debe tenerse en cuenta que el aumento de 1.5 °C enfrentará al planeta con impactos climáticos severos que serán significativamente peores si la temperatura aumenta a 2 °C. Veamos entonces algunas comparaciones entre las dos temperaturas:

1. *Temperaturas extremas.* El promedio y temperaturas extremas será mucho mayor en todas las áreas habitadas. Por ejemplo, 14% de la población mundial sufrirá severos calores por lo menos una vez cada cinco años, mientras que, si la temperatura sube 2 °C, será 37% de la población quien la padezca.

2. *Sequías*. La probabilidad de sequías y el riesgo de obtener agua puede reducirse sustancialmente si el calentamiento se mantiene en 1.5 °C, pero se prevé que el riesgo sería significativamente mayor en el Mediterráneo y el sur de África si se alcanzan los 2 °C.
3. *Lluvias torrenciales e inundaciones*. Las regiones de alta latitud y montañosas, así como el este asiático y la Norteamérica del norte, se proyecta que experimentarán lluvias más intensas si la temperatura sube 2 °C.
4. *Deshielo del Ártico*. Si la temperatura sube 2 °C la frecuencia de tener un mar libre de hielo se incrementará por lo menos cada 10 años, lo que conlleva a una mayor absorción de calor que impactará la circulación de los océanos y tendrá consecuencias en la temperatura de los inviernos en el hemisferio Norte.
5. *Pérdida de especies*. Con un aumento de 2 °C, 18% de los insectos, 16% de las plantas y 8% de los vertebrados se proyecta que se reducirán a la mitad de la cantidad que son actualmente, mientras con 1.5 °C se reducirían en dos tercios los insectos y en la mitad las plantas y vertebrados.
6. *Seguridad alimenticia y salud*. Los riesgos de falta de alimentos que se proyectan serán mayores en el Sahel, sur del África, Mediterráneo y Amazonas con un aumento de 2 °C en lugar de los 1.5 °C, lo mismo sucedería con la pesca, la acuicultura y los riesgos a la salud humana, incluyendo aquellos relacionados con el calor en las áreas urbanas.
7. *Crecimiento económico*. Las pérdidas económicas son mayores cuanto más se eleve la temperatura en lugares con recursos limitados, tales como África, sureste asiático, India, Brasil y México (ver la Tabla 1).

## Características del colapso de los ecosistemas

El efecto sinérgico de las perturbaciones directas de los humanos, aunadas al cambio climático ha causado una extinción masiva de especies, de 100 a 1 000 veces más rápido que en el pasado. La disminución de las áreas de

bosques ha reducido la biodiversidad entre 10 y 70%. Es esencial que los científicos exploren los fenómenos y procesos que suceden hoy en día para definir las causas de la extinción masiva de los ecosistemas vulnerables y predecir los puntos que causan el colapso. Los detonadores de las recientes extinciones masivas pueden clasificarse en dos grupos, efectos humanos directos e indirectos.

TABLA 1. *Efectos producidos por el aumento en la temperatura terrestre de 1.5 °C vs. 2 °C*

1.5 °C de calentamiento	vs.	2 °C de calentamiento
	Calor intenso	
Hasta 1.1 meses		Hasta 1.5 meses
	Agua dulce	
9%		17%
	Fuertes lluvias mayor intensidad	
5%		7%
	Rendimiento de cosechas	
↓ Producción de trigo 9%		↓ Producción de trigo 9%
↓ Producción de maíz 3%		↓ Producción de maíz 3%
↑ Producción de soya 6%		↑ Producción de soya 6%
↑ Producción de arroz 6%		↑ Producción de arroz 6%
	Elevación del nivel del mar 2000 vs. 2100	
↑ 40 cm		↑ 50 cm
	Blanqueamiento de corales	
90%		98%



### ***Efectos directos***

Los efectos directos tales como la deforestación, la caza y la contaminación han alterado el medio ambiente por las actividades humanas que pueden trazarse en el Paleolítico, cuando los humanos se expandieron por Eurasia y empezaron a ejercer un gran impacto a mayor escala al convertirse en mejores cazadores. Podemos decir que los principales eventos que desencadenan el proceso fueron la aparición de la agricultura, la era de los descubrimientos (siglos xv al xviii) seguidos de la revolución industrial (1760-1840). Tómese en consideración que la población mundial crece a un ritmo de 80 millones de personas por año y esta enorme presión se manifiesta como un efecto directo del ser humano que dispara la extinción masiva como son la disminución de la biodiversidad y la biomasa.

### ***Efectos indirectos***

Los efectos indirectos se refieren generalmente al cambio climático generado por el hombre. Por ejemplo, el desarrollo de la agricultura y la revolución industrial aceleraron el cambio climático de manera dramática. La agricultura modifica el clima de varias maneras. Es una gran emisora de gases de efecto invernadero, altera la campiña y provoca desertificación. La industrialización cataliza el cambio climático con mayor velocidad, con las consecuencias que anteriormente hemos descrito: eventos extremos, sequías, inundaciones, ondas de calor, huracanes, etcétera.

## **¿Por qué suceden los colapsos?**

Hoy en día muchas personas asocian los colapsos pasados con el medio ambiente. Particularmente los arqueólogos, historiadores y expertos en sustentabilidad se enfocan en los cambios climáticos, daños ambientales y colapsos, tratando de entender lo que le sucedió a las sociedades anteriores y los daños que enfrentan las sociedades contemporáneas. En 1917 Ellsworth Huntington propuso que el clima es el factor determinante en la distribución geográfica de la civilización; es el clima el que fija el patrón

espacial de la civilización, y cada civilización en la historia ha tenido su óptimo climático. De modo que en cada etapa de la civilización la eficiencia del clima, gradada desde muy alta —la más favorable—, hasta muy baja —la más desfavorable—, varía espacialmente, controlando así la distribución geográfica del progreso. Para sustentar sus tesis sobre la relación entre clima y cultura Huntington analizó en detalle, para varias regiones de los países, por medio de cifras, tablas y gráficos, la relación entre la actividad humana y la temperatura variable estacionalmente y con la latitud; la influencia de las estaciones y del tiempo y las tormentas en la actividad mental y las reacciones psicológicas de los individuos, y sus influencias sobre las condiciones sociales y la religión en distintos lugares de la tierra. Sus conclusiones son del siguiente tenor:

El efecto fisiológico de las tormentas, como también el agrícola, parece ser un factor decisivo en el carácter nacional [...] El clima del norte de los Estados Unidos, gracias a las tormentas, es en extremo estimulante. Tal clima hace que el individuo progrese con gran rapidez [...] Es posible apreciarlo en la actividad y en la algarabía de los niños, así como también en la tendencia que tiene el estadounidense a estar haciendo siempre “algo”.

Los cambios bruscos del tiempo ocurridos en las tormentas, retan al labrador, haciendo que éste se mantenga más alerta y activo que sus compañeros de aquellas regiones más extensas donde los cambios de tiempo son usualmente más lentos, siendo más frecuentes las sequías y los desastres relacionados con ellas. Fomentan también un sistema social que otorga gran importancia a las cualidades dinámicas que es necesario poseer para poder vencer tales dificultades. La influencia del clima sobre el hombre puede compararse a la que tiene el jinete sobre su caballo. Algunos jinetes dejan que su caballo camine como quiera. El caballo podrá correr de vez en cuando, si así lo desea, pero generalmente marchará a paso lento. Esa clase de jinetes se asemeja al clima poco estimulante. Otros jinetes, en cambio, fustigan constantemente al caballo, exigiéndole siempre un esfuerzo máximo.

## La metáfora de los puntos cruciales

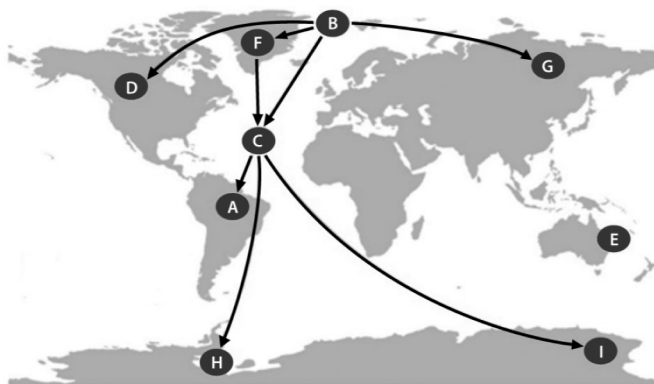
Los ecosistemas son capaces de exhibir múltiples estados que pueden detallarse como estables y persistentes en un futuro previsible. La habilidad para asimilar cambios y persistir con una mínima transformación se emplea a menudo como una medida de la estabilidad del estado de un ecosistema. El concepto de punto crítico tiene sus orígenes en artículos científicos de la química y la matemática (entre 1884 y 1885), y se refiere a un cambio cualitativo en un sistema descrito matemáticamente como una bifurcación. La teoría de la bifurcación todavía sigue siendo empleada en diversos campos de la ciencia. En lugar de emplear la manera formal de la teoría, los científicos sociales aplican diferentes modelos matemáticos o usan el concepto de manera metafórica. Un punto crítico se define como “un punto en el cual un sistema (ecológico) experimenta un cambio cualitativo, la mayoría de las veces abrupto y de manera discontinua”. Técnicamente un cambio abrupto del clima ocurre cuando el sistema climático es forzado a cruzar un punto crítico que desencadena eliminar una transición a un nuevo estado muy rápidamente. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) aporta al mundo una opinión objetiva y científica sobre el cambio climático, sus impactos y riesgos naturales, políticos y económicos y las posibles opciones de respuesta, define el cambio abrupto del clima como un cambio a gran escala del sistema, que se lleva a cabo en unas cuantas décadas o menos, persistiendo por lo menos algunas décadas y que causa trastornos sustanciales a los humanos y a los sistemas naturales. Recuérdese que la metáfora es una figura retórica consistente en nombrar un término real con uno imaginario, entre los cuales existe una relación de semejanza. Un ejemplo de lo anterior podría ser el de un vaso de agua que al moverlo cae al suelo y por ende tiene un punto crucial, es decir, que el objeto es desplazado desde un estado de equilibrio a otro que es cualitativamente diferente (y en general peor) del primero. Los puntos críticos pueden extrapolarse al conocimiento de fenómenos complejos y abstractos como puede ser el sistema climático, que visto como un objeto tiene un punto crítico cuyo centro de gravedad es sobrepasado. Además, hay que añadir que los estados alternativos inducidos

por el punto crítico son a menudo estables. Estos estados exhiben típicamente una población única y una dinámica del ecosistema que se compara con el que tenía antes, lo que hace que el regreso a su estado original sea un gran reto.

## ¿Cuáles puntos críticos se han rebasado?

Apremiantes son las preguntas que circulan con respecto a las fuerzas que operan en este momento que empujan al sistema climático más allá de su punto crítico, cuánto tiempo tenemos para que no suceda y cómo podemos controlar y contener esas fuerzas a fin de detener su influencia negativa en el sistema climático. Los puntos críticos potenciales se presentan en tres formas: la pérdida constante de las capas de hielo con lo cual se acelera el aumento del nivel del mar, los bosques y otras fuentes naturales que almacenan el carbono tales como el permafrost y que actualmente lo liberan a la atmósfera como dióxido de carbono, acelerando el calentamiento y provocando cambios negativos en el sistema de circulación del océano que moviliza el calor alrededor del mundo y puede dictar el futuro del clima, específicamente colapsando los bosques del Amazonas, creando una sequía prácticamente permanente en la región del Sahel africano, disturbando los monzones en Asia y calentando el Océano del Sur, que puede provocar una elevación del nivel del mar en la Antártida del oeste.

Un grupo de investigadores encabezados por Tin Lenton, de la Universidad de Exeter, en Inglaterra, temen que nueve de los 15 elementos críticos del planeta (ver la Figura 15) han sido rebasados, por lo que hay soporte científico para declarar un estado de emergencia planetario. Los resultados indican que estos cambios en el ecosistema terrestre ocurren en una escala de tiempo de años o décadas por lo que el colapso de los grandes ecosistemas más vulnerables como el bosque lluvioso del Amazonas y la zona caribeña de corales se colapsarán en unas cuantas décadas una vez que hayan pasado el punto crítico. Tómese en consideración para el caso de los corales que éstos proveen alimento y protección costera a unas 1 000 millones de personas en el mundo. El mecanismo básico de cómo actúan

FIGURA 15. *Los nueve puntos críticos*

- |  |  |
|--|--|
| A. Sequías en el Amazonas                        | F. Aceleración de pérdida de hielo en Groenlandia        |
| B. Reducción de áreas en el Ártico               | G. Descongelamiento del permafrost                       |
| C. Disminución de la circulación en el Atlántico | H. Aceleración de pérdida de hielo en la Antártica Oeste |
| D. Incendios y pestes en bosques boreales        | I. Aceleración de pérdida de hielo en la Antártica Este  |
| E. Disminución de arrecifes de corales           |  |

estos puntos críticos ha sido bien comprendido por años, aunque la predicción del tiempo antes de que se activen no es tan preciso.

La verdadera inquietud se enfoca en identificar el potencial que tienen los puntos críticos para crear una “cascada” en la que la ruptura de uno de ellos desencadena la aparición de otros creando de esta manera una rápida escala del daño. Una de las grandes preocupaciones de que se presente una “cascada” la representa el sistema de circulación oceánica, centrada en el Atlántico del Norte. La circulación se inicia con la evaporación de las aguas cálidas que se mueven hacia el norte, que dejan atrás aguas más saladas y densas que se hunden. Este proceso es el responsable de manejar la circulación del océano, distribuir calor alrededor del globo, y es el más importante regulador del clima del planeta y la principal razón de porqué el hemisferio del Norte es más caliente que el del Sur. El proceso anterior ha sido disturbado enormemente, pues el calentamiento en el Ártico y el derretimiento de los hielos de Groenlandia generan agua que es menos densa y se hunde menos, por lo que los científicos calculan que el movimiento de las aguas se ha debilitado en 15%. El cambio climático no es la única preocupación más importante en lo que concierne a la atmósfera del planeta.

El cáncer, la diabetes, las enfermedades del corazón y otras enfermedades no transmisibles, muchas de las cuales se relacionan con la contaminación del aire y del agua, están al alza en todo el mundo. En la mayoría de los países lo que gasta una persona en asuntos de la salud se eleva más rápido que lo que el individuo gana por su trabajo.

## **Crecimiento económico vs. cambio ambiental**

Considerado hasta hace poco como algo que no nos afectaba, la salud del medio ambiente ha tomado gran relevancia en los modelos que emplean los economistas. Hace ya algunos años el gobierno británico le comisionó a un economista, Nicholas Stern, un estudio sobre el clima, resultando en un documento de 700 páginas que ha sido hasta hoy en día consulta indispensable para evaluar los cambios climáticos y su impacto sobre la economía global si seguimos emitiendo contaminación por carbono sin poner un freno. Se encontró que reduciendo la emisión de dióxido de carbono para mantener una concentración atmosférica entre 450 y 500 ppm, costaría 1% del producto interno bruto (PIB), pero si se ignora el cambio climático el daño económico sería del orden de 20% del PIB. Recuérdese que el PIB es el total monetario en el mercado de todos los bienes y servicios de un país, expresado generalmente de manera anual. El resultado de Stern es contundente, aunque en la realidad no ha inspirado muchas acciones para combatir el cambio que ha sido apreciado, así como debatido en los años siguientes. Entretanto, al economista americano William D. Nordhaus y a su colega Paul Romer les otorgaron el Premio Nobel de Economía por haber desarrollado un modelo que integra el cambio climático respecto al análisis económico a largo plazo. Los modelos muestran que si fuésemos a reducir rápidamente las emisiones de carbono, como dicen los científicos que es necesario para no colapsar, por ejemplo, poniendo altos impuestos a los productos que contienen carbono, se disminuiría el crecimiento económico. Para los científicos lo anterior no representa un problema, debemos hacer lo que sea para evitar una catástrofe climática. Pero para los economistas como Nordhaus esto no es aceptable, según él hay que hacer todo lo necesario para crecer económicamente. Los científ-

cos dicen que hubiésemos podido no subir más de 1.5 °C algunas décadas atrás, pero ahora es muy tarde. El IPCC claramente afirma que es necesario descarbonizar completamente la economía mundial para mediados de este siglo. Si continuamos creciendo, la economía se triplicará en el mismo periodo, por lo que será muy difícil descarbonizar tan rápidamente en esa época futura.

## Sostenibilidad y resiliencia

La sostenibilidad es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social. Alcanzar la sostenibilidad es hoy en día una meta para muchas sociedades humanas y en diferentes escalas. Las naciones buscan promover y alcanzar la sostenibilidad en la agricultura y producción de alimentos, crecimiento económico, generación de energía, al tiempo que tratan, por lo menos en el papel, de crear comunidades en donde los ciudadanos puedan vivir. Una sociedad sostenible es aquella que no colapsa y se mantiene indefinidamente, siendo capaz de adaptarse a los cambios.

La teoría de la resiliencia ha sido aplicada a la ecología, las ciencias sociales, incluyendo la arqueología, para tratar de entender cómo funciona un amplio grupo de sistemas. La resiliencia se define como la capacidad de un sistema de absorber una perturbación y reorganizarse al tiempo que hace los cambios necesarios para retener esencialmente las mismas funciones, estructura e identidad iniciales. Muchos piensan que un colapso permite la innovación y el cambio, se usa ahora el término *destrucción creativa* para describir las perturbaciones que periódicamente interrumpen el ciclo adaptativo.

La Figura 16 esquematiza el proceso del que hablamos, en donde un sistema llega a un punto crítico al no poder la resiliencia detener el disturbio, y después del colapso hay todavía gente y memorias sociales que les permite recordar el pasado y recrearlo. Después del colapso emerge una sociedad compleja con una escala diferente, creándose un sistema diferente al que le dio inicialmente origen. La teoría de la resiliencia no necesaria-

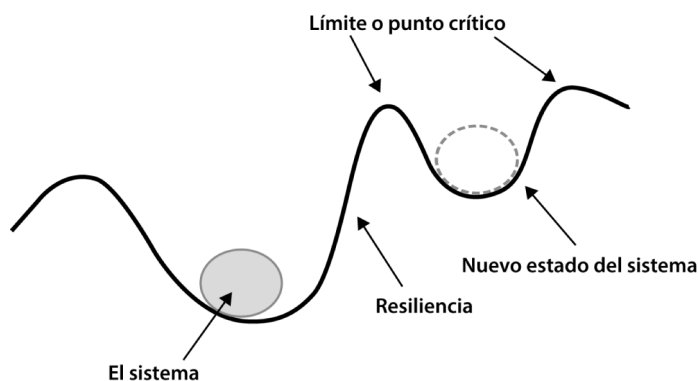
mente significa que los colapsos u otros tipos de cambios son inusuales o poco comunes, más bien incluye al colapso como una parte normal de un ciclo que puede identificarse en sistemas de varios tipos en los que existen constantes cambios a diferentes niveles. Algunos piensan que el colapso puede conducir a la innovación y al cambio.

## ¿Se puede evitar el colapso?

El famoso informe *Los límites del crecimiento*, elaborado en la década de 1970 para el Club de Roma, indicaba que la Tierra colapsaría en el siglo XXI si se mantenía el crecimiento demográfico de la población, la industrialización, la producción de alimentos, la contaminación y la explotación de los recursos naturales, muchos políticos, economistas e investigadores lo niegan por ser fatalista.

Ugo Bardi es un profesor de química que de tiempo atrás estudia la ciencia del colapso, qué es, qué tienen en común los colapsos a diferentes escalas y cómo podemos reconocer que el colapso de un sistema es inminente y qué hacer para que la caída no se produzca. Como observa, los colapsos son eventos rápidos que se extienden por periodos muy prolongados, refiere este fenómeno como el Efecto Séneca, el filósofo romano Lucius Annaeus Séneca quien observó este efecto cuando escribió: “la fortuna es de crecimiento lento, pero la ruina es rápida”. Según Bardi, es posible que un colapso dé pie para un nuevo tipo de civilización que elimine las estructuras pasadas de moda y emerja una nueva sociedad que crezca más rápido que la anterior, independientemente qué países y regiones experimenten el colapso, las crisis, sequías, hambrunas, violencia y guerra como resultado del caos climático que padecemos. Las causas subyacentes de pasar el punto crítico son siempre las mismas. En primer lugar, hay movimiento rápido, acción o cambio. En segundo lugar, existe algún tipo de barrera o límite más allá del cual el movimiento, la acción o el cambio no deben ir. En tercer lugar, hay dificultades de control por distracción, datos falaces, una retroalimentación retardada, mala información, respuesta lenta o simple inercia. Si lo vemos a la escala en la que la población humana y la economía extraen recursos de la tierra y emiten desperdicios con-



FIGURA 16. *El proceso de colapso y nuevo estado del sistema*

taminantes hacia el medio ambiente, muchas de estas tasas de extracción y emisión han crecido hasta magnitudes insoportables. La sociedad humana ha sobrepasado sus límites, los cambios son demasiado rápidos. Las señales aparecen tarde, son incompletas, están distorsionadas, son ignoradas o negadas. La inercia es grande. Las respuestas son lentas. Tras el colapso, puede desencadenarse una cierta serie de consecuencias posibles. Una de ellas, desde luego, es algún tipo de choque. Otra es una rectificación deliberada, una corrección, una cuidadosa reducción de intensidad. Creemos que es posible una corrección y que puede desembocar en un deseable, suficiente, equitativo y sostenible futuro. También creemos que si no se hace una corrección un colapso de algún tipo es no sólo posible, sino igualmente seguro, y podría ocurrir dentro de las expectativas de vida de muchos de los que hoy en día asisten al espectáculo. Pero la ciencia no acepta lo anterior como posibilidad, por tanto, ignorando el riesgo de algún tipo de colapso, ya sea al final del siglo, a mitad del siglo o en los próximos 10 años, contraviene las implicaciones de los modelos científicos más robustos que tenemos.



## II. Adaptación

Desde la época de los antiguos griegos las creencias populares han especulado que arrasando con un bosque, irrigando un desierto, drenando una marisma o limpiando las tierras de pastoreo para eliminar residuos indeseables puede cambiar la temperatura y el régimen de lluvias en las zonas cercanas. A finales del siglo XIX los meteorólogos habían acumulado suficiente información experimental sobre el clima para verificar si la lluvia iba siguiendo los cultivos o escapaba en los lugares podados. Ambas ideas fallaron en verificar una u otra teoría. Si los espectaculares cambios negativos generados por la humanidad no alteraban el clima de una región, parecía entonces innecesario considerar el impacto en otras especies. Hasta la primera mitad del siglo XX los científicos que estudiaban el clima trataban a los ecosistemas como pasivos. Los desiertos y los bosques se expandían o contraían como una respuesta indiferente a los cambios climáticos, los cuales, se creía, eran causados por perturbaciones en la disposición de las montañas o bien por variaciones del Sol. Existían unos cuantos científicos que no veían las cosas de esa manera. Uno de ellos fue Vladimir I. Vernadsky (1863-1945). Insistía en que la humanidad era un factor geológico que afectaba y cambiaba el medio ambiente natural, y reconoció que el volumen de materiales producido por los humanos estaba alcanzando proporciones geológicas. Analizando los procesos bioquímicos, concluyó que el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono que conformaban la atmósfera terrestre estaba siendo incrementado por las actividades humanas. Más aún, insistía en que la química de prácticamente cualquier

elemento de la corteza terrestre estaba influenciada por procesos biológicos. En 1920 publicó trabajos argumentando que los organismos vivos constituirían una fuerza que modelaba al planeta de la misma manera que lo hacían las fuerzas físicas. Unos cuantos científicos empezaron a estudiar el cómo las criaturas vivientes afectaban la química de la superficie terrestre, sin embargo, el pronunciamiento visionario de Vernadsky en el que veía a la humanidad como una gran fuerza geológica no fue muy conocido. El primer campeón creíble de la influencia de la vida en el clima fue el ingeniero inglés G. S. Callendar, quien desde 1938 publicó argumentos basados en mediciones de las emisiones de dióxido de carbono que iban en aumento y estaban produciendo un calentamiento del planeta. A primera vista parece discordante que la humanidad en general haya experimentado una mejoría sustancial y sostenida en la esperanza de vida al tiempo que los ecosistemas de todo el mundo se degradan a un ritmo sin precedentes. A raíz de esta aparente contradicción, una evaluación de las diferencias entre las tendencias ambientales y el bienestar de la humanidad ha dado lugar a varias posibles explicaciones del fenómeno:

- Una primera interpretación apunta a que el bienestar es dependiente de la prestación de servicios alimenticios, de los cuales se ha incrementado su demanda en detrimento de los que son capaces de suministrar los ecosistemas. Una segunda explicación dice que la tecnología y la infraestructura han desvinculado el bienestar de la humanidad de la naturaleza al incrementar la eficiencia con la que hoy en día se pueden explotar los beneficios que proveen los ecosistemas.
- Otra explicación afirma que puede existir un rezago en el tiempo que transcurre entre el deterioro de los ecosistemas y las subsecuentes reducciones en el bienestar humano que ocasionan. Los cálculos empleados, como la esperanza de vida, no permiten predecir lo que sucederá en el futuro, pues también representan la apreciación de aquellos que han alcanzado una edad avanzada y que se han beneficiado ampliamente de la explotación de los recursos del planeta. Tales estadísticas pueden dar un sentido falso de alivio de que todo está bien, aunque carecen de capacidad predictiva. Por tanto, es necesario cambiar el modelo que rige las actividades de una curva de

crecimiento exponencial (como el empleado habitualmente) a una de crecimiento logístico que garantice la supervivencia de la especie en el largo plazo. A pesar de lo dicho, los efectos en salud producto de los cambios del medio ambiente incluyen los climáticos, la acidificación de los océanos, la degradación del campo, la falta de agua, la sobreexplotación de la pesquería y la pérdida de la biodiversidad, entre otros. Todo eso pone en riesgo lo que hemos ganado a nivel global de salud poblacional en las últimas décadas y muy posiblemente el riesgo será incrementalmente dominante en la segunda mitad de este siglo, gobernado por una alta desigualdad e ineficiencia de los patrones de consumo de los recursos. La sustentabilidad de sectores industriales clave dependerá de que se beneficien, pero al mismo tiempo contribuyan a un clima sin contaminantes y obedece en buena medida a su capacidad para implementar nuevas tecnologías que comercialicen productos, tecnologías y servicios amigables con el ambiente para abatir el cambio climático. En vista de que de alguna manera ya nos encontramos en una fase de cambio climático producido por los humanos, responder a esa contingencia involucra dos largas aproximaciones:

1. Adaptarse a los cambios climáticos ya presentes en el planeta (*adaptación*).
2. Reducir las emisiones y estabilizar los niveles de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera (*mitigación*).

## ¿Qué es la adaptación al cambio climático?

La adaptación es un campo del conocimiento que se enfoca en prepararnos para afrontar y responder a los impactos de los cambios climáticos presentes y futuros. Más formalmente se ha definido como “las iniciativas y medidas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos contra los efectos actuales o esperados debidos al cambio climático”. Como la definición lo sugiere, la adaptación climática se enfoca primordialmente en las respuestas humanas al cambio climático, lo que se distingue del término *adaptación* de la biología evolutiva tradicional que se enfoca en los cambios

genéticos en el tiempo como respuesta a presiones selectivas. Ya que la adaptación es fundamental para manejar el cambio, puede pensarse en un proceso continuo en lugar de uno que tiene un fin fijo. Las acciones que se tomen para prepararse para los impactos que vendrán se pueden referir como adaptaciones proactivas, mientras que las acciones en respuesta a los problemas generados por el cambio climático pueden referirse como adaptación reactiva. Por ejemplo, las estrategias de adaptación en respuesta a las sequías intensas e incendios forestales pueden incluir acciones anticipadas, como quemas controladas o reducción selectiva de la cantidad de árboles para reducir la intensidad de incendios futuros, al tiempo que las acciones de adaptación reactivas pueden incluir ampliar la composición genética de los árboles que reforesten el lugar incendiado con el fin de incorporar especies mejoradas que resistan las condiciones climáticas futuras. Algunos ejemplos adicionales de actividades de adaptación pueden ser los siguientes:

- Practicar la eficiencia energética.
- Mayor uso de energías renovables.
- Electrificación de procesos industriales.
- Implementación de medios de transportes eficientes: transporte público eléctrico, bicicleta, coches compartidos...
- Impuesto sobre el carbono y mercados de emisiones.
- Defensa costera a través del mantenimiento y/o restauración de los manglares y otros terrenos costeros para reducir la erosión y las inundaciones.
- Adaptar el diseño y manejo de las áreas marinas protegidas para salvaguardar los arrecifes de corales que tienen la habilidad de actuar como barreras naturales que disipan la energía de las olas y mantienen el hábitat necesario para los peces.

## **Remover el dióxido de carbono**

Aunque consiguiéramos detener súbitamente las emisiones excesivas de dióxido de carbono, no podríamos detener el impacto de los gases de efecto invernadero. El calentamiento global es un hecho, así que sólo nos que-

da adaptarnos o buscar soluciones más creativas. Dado que estabilizar el dióxido de carbono atmosférico requerirá de reducciones drásticas de las emisiones, se han propuesto metodologías para removerlo. Un método está basado en técnicas para incrementar la captura del carbono por el secuestro natural, que no incluye las medidas encaminadas a limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> antes de que lleguen a la biósfera. Hoy en día, la opción tecnológicamente bien establecida y con costos de operación bajos es sin duda el manejo de la tierra que conduzca a mejorar el atrapamiento del gas en los medios biológicos disponibles. Se estima que esta estrategia tiene el potencial de acumular entre 660 y 900 Gt de CO<sub>2</sub>, equivalentes a las pérdidas históricas de carbono de los ecosistemas nativos como resultado de los cambios en el uso del suelo por los humanos, particularmente en el sector agrícola. A continuación, se describen algunas de las tecnologías más relevantes de mitigación natural que se proponen. Esta definición engloba estrategias tales como la forestación-reforestación, el secuestro del carbono en el suelo, la meteorización o la mineralización del carbono, el biocarbón, así como la fertilización de los océanos.

## Forestación y reforestación

La forestación es la conversión de tierras no forestales en bosques. La reforestación es semejante, pero la conversión se realiza en tierras que antiguamente habían sido forestales (ver la Figura 17). La protección de los bosques es un tema ecológico crítico que requiere ser apoyado en cualquier propuesta de mejoramiento ambiental por instrumentos económicos y jurídicos adecuados.

Los bosques tienen gran importancia en el tema de conservación ambiental porque, dependiendo de su manejo, pueden ser a su vez una causa y una solución al problema: la deforestación de los bosques contribuye a la liberación del CO<sub>2</sub>, aunque los bosques, a su vez, proveen servicios ambientales regulando el agua, reduciendo la erosión, limpiando el aire y creando un microclima. Los árboles más jóvenes absorben dióxido de carbono rápidamente mientras crecen. A medida que un árbol envejece, se alcanza un estado estable en el que la cantidad de carbono absorbida por

FIGURA 17. *Terrenos en vías de reforestación*

la fotosíntesis es similar a la que se pierde por la respiración y la descomposición. Si los árboles se cosechan cuidadosamente cerca de este momento en el ciclo de crecimiento, y se plantan árboles nuevos o se permite su regeneración, esto puede mantener al bosque como un “sumidero” neto de carbono. Por lo tanto, una gestión forestal cuidadosa puede significar que los bosques pueden absorber la mayor cantidad posible de carbono. De la capacidad de almacenamiento de  $\text{CO}_2$  de un árbol, un tercio se realiza sobre la superficie y dos tercios bajo tierra. La actividad forestal, además de generar importantes bienes y servicios económicos, debe tener un eficiente desempeño ambiental para mejorar la productividad, la eficiencia en el uso de materia prima y la energía en la producción. En los reportes científicos se incluye a estas actividades como uno de los posibles mecanismos de desarrollo limpio. Se menciona, con relación a los sumideros, que:

Las variaciones netas de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero que se deban a la actividad humana directamente relacionada con el cambio del uso de la tierra y la silvicultura, limitada a la forestación, reforestación y deforestación desde 1990, calculadas como variaciones verificables del carbono almacenado en cada periodo de compromiso, serán utilizadas a los efectos de cumplir los compromisos de cada participante.



La deforestación durante el decenio de 1990 se estimó en 14.6 millones de hectáreas al año, en otras palabras, durante la década de 1990 el mundo perdió 4.2% de sus bosques naturales, pero ganó 1.8% a través de la reforestación (con plantaciones), la forestación y la expansión natural de los bosques. Los proyectos forestales presentan varias particularidades, ya que, asociados al hecho de no ser permanentes, la captura de carbono está expuesta a problemas imprevistos naturales o antropogénicos, como podrían ser ataques de plagas y/o los incendios forestales en donde las cantidades absorbidas pueden ser emitidas de nuevo a la atmósfera en cualquier momento. Las prácticas de forestación-reforestación pueden además provocar efectos nocivos. Conforme el crecimiento de biomasa sea mayor, se produce más secuestro del dióxido de carbono, y por ello una menor radiación reflejada que incide en el calentamiento de la superficie terrestre. Existe consenso de que la menor radiación reflejada de los bosques boreales acelera el calentamiento local y, por ende, la reducción de la cobertura de nieve. La forestación-reforestación que se lleva a cabo en las regiones tropicales, dado que son lugares de alta producción, puede generar un enfriamiento por evapotranspiración.

## **Secuestro del carbono en el suelo**

Se ha considerado a los suelos como un sumidero de carbono debido a la capacidad que tienen para almacenar este elemento en forma orgánica (1 500 000 billones de toneladas a 1 m de profundidad y 2 456 millones de toneladas métricas a 2 m de profundidad) e inorgánica (1 700 millones de toneladas), la cual sobrepasa considerablemente la que presentan la vegetación (650 millones de toneladas) y la atmósfera (750 millones de toneladas). El secuestro se lleva a cabo aumentando en el suelo el contenido de carbono orgánico, lo que trae como consecuencia una remoción neta del dióxido de carbono presente en la atmósfera. Ya que el nivel de carbono en el suelo es un balance de la adición de carbono y las pérdidas que suceden por el movimiento del suelo, las estrategias que incrementan la adición o reducen las pérdidas promueven el secuestro del carbono. La conversión de largo plazo de praderas y áreas forestales en terrenos de cul-

tivo (y pastoriles) ha resultado en pérdidas globales históricas de carbono del suelo. No obstante, existe una potencial para incrementar el contenido de carbono del suelo mediante la rehabilitación de suelos degradados. La salud de los suelos, cuya cantidad de materia orgánica es el principal indicador, controla la capacidad de producción de los campos, donde suelos sanos, estables y productivos permiten a los agricultores enfrentar, de mejor forma, los vaivenes del mercado y los efectos del cambio climático. El desarrollo de la agricultura durante los últimos siglos y especialmente en los últimos decenios ha implicado el agotamiento sustantivo de las reservas de carbono. Se sabe que los suelos con deficiencia de carbono tienen la habilidad de guardar cantidades sustanciales del mismo. Este proceso puede durar por varias décadas antes de que se establezca un nuevo equilibrio, determinado por el clima y la manera en que se maneja el suelo. Es importante hacer notar que las ganancias en atrapar al carbono son reversibles y su pérdida es producto del mal manejo de la tierra. Para que esto no ocurra, es necesario que los agricultores tomen conciencia de la necesidad de efectuar cambios en las prácticas agrícolas tradicionales, buscando aportar más materia orgánica, que ésta sea más estable, y/o que retarde su descomposición. Por otra parte, el secuestro de carbono en suelo incrementa a su vez la disponibilidad de nitrógeno orgánico que puede mineralizarse y funcionar como sustrato para la producción de óxido nítrico ( $\text{NO}_2$ ), que es un potente agente oxidante con efectos difíciles de cuantificar.

## Fertilización de los océanos

Este proceso se basa en incrementar la producción biológica al añadir deliberadamente nutrientes en las aguas oceánicas. En muchas zonas del mar el crecimiento del fitoplancton se ve limitado por la escasez de un oligoelemento esencial para la fotosíntesis: el hierro. Se trata entonces de acelerar el ritmo de crecimiento del fitoplancton para que sea 30 veces más rápido de lo normal y crear así lo que podríamos llamar “pozos de carbono” oceánicos, por analogía de un principio muy similar al aplicado en los bosques que trata de convertirlos en “pozos de carbono” terrestres. Los investigadores aseguran que el hierro induce el crecimiento de pequeñas plantas

marinas que se hunden en el océano y se llevan con ellas el  $\text{CO}_2$ . Esta idea no es nueva, en 1970 el oceanógrafo John Martin se hizo célebre con la frase de “facilítenme una tonelada de hierro y provocaré el advenimiento de la próxima era glacial”. El hierro se halla presente en el polvo que circula en la atmósfera, sobre todo cuando las condiciones climáticas son secas y áridas. Por eso no es sorprendente que algunos desiertos como el Sahara y el Sahel concentren la mayor cantidad de este polvo, que los vientos dominantes trasladan hasta el Caribe y el nordeste de América Latina. Se estima que con el enriquecimiento de la totalidad del Océano Austral con hierro sólo se conseguiría disminuir entre 20 y 30% el índice del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera a lo largo de un siglo. Lo anterior tendría graves repercusiones porque acarrearía trastornos ecológicos considerables. Los experimentos han demostrado que la adición de hierro estimula el crecimiento del fitoplancton y absorbe el  $\text{CO}_2$ , pero no han dejado claro si el carbono vuelve a liberarse cuando las plantas mueren o por medio de la respiración de los pequeños animales (zooplancton) que se alimentan de ellas. En efecto, los organismos muertos consumen oxígeno al descomponerse, si se multiplica artificialmente su descomposición se corre el riesgo de disminuir el índice de oxígeno del océano, lo cual puede causar estragos entre los seres vivos marinos. Además, la proliferación de algas puede causar anoxia (carencia de oxígeno) en la superficie de los océanos, puesto que la desmineralización provoca hundimiento de la materia orgánica.

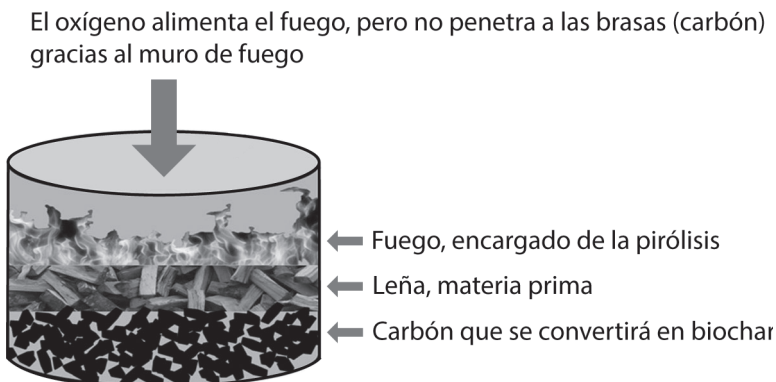
## Biocarbón

El biocarbón (también conocido por el término en inglés *biochar*) es un tipo de carbón producido mediante el calentamiento de material vegetal. Puede utilizarse como combustible o fertilizante, y por lo tanto es de interés para cuestiones como la deforestación, la resistencia de los ecosistemas agrícolas y la producción de energía, especialmente en los países en desarrollo. La pirólisis consiste en la descomposición térmica de los materiales orgánicos con escaso o limitado suministro de oxígeno a temperaturas inferiores a los  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , lo que lo hace diferente al carbón usado como combustible y al activado (ver la Figura 18). El resultado es un material que

almacena la mitad del  $\text{CO}_2$  de la materia orgánica descompuesta, utilizado por las plantas en sus periodos de crecimiento, lo que permite reducir la emisión a la atmósfera de buena parte de este gas. También está presente en ecosistemas susceptibles de incendiarse, generando hasta 35% del total de carbono orgánico de estos sistemas, denominado como carbono pirogénico. Además de almacenar el dióxido de carbono, el biocarbón parece presentar otros beneficios para el entorno. Según los investigadores, existen indicios que apuntan a que su incorporación al suelo favorecería la retención de humedad, el aumento de la vida microbiana y, con ello, la producción agrícola. También el biocarbón parece tener un efecto positivo en el balance de agua que está presente en el suelo. Tampoco se sabe mucho de los cambios que el biocarbón genera en la composición microbiana del suelo.

El uso potencial de este material para reducir las emisiones está determinado por la cantidad de biomasa disponible para la pirólisis y los críticos de estas técnicas temen que, si la materia prima no es escogida apropiadamente, la implementación a gran escala de la producción de biocarbón puede causar deforestación, pérdida del hábitat, de la biodiversidad y erosión del suelo. Los científicos consideran que para que la materia prima sea sustentable debe satisfacer los siguientes criterios: (a) no causar cambios en la tierra o deforestación, (b) extraerse a una velocidad que no oca-

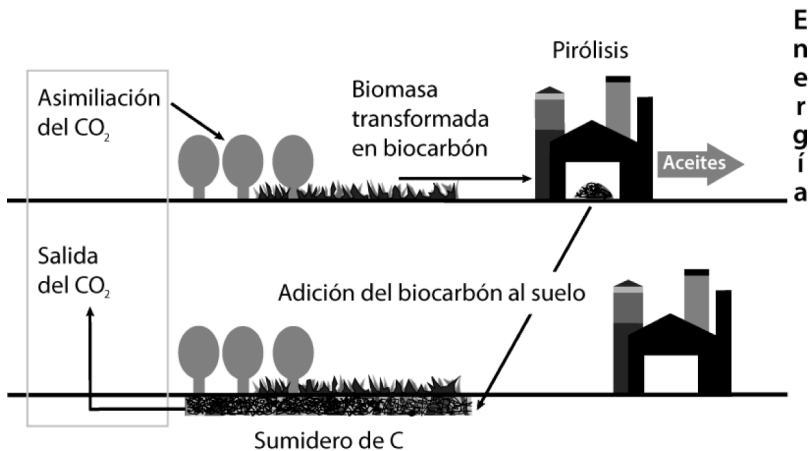
FIGURA 18. Producción de biocarbón



sione erosión del suelo o pérdida de las funciones, y (c) no debe provenir de desechos industriales (ver la Figura 19). Estos proyectos pueden tener repercusiones tanto positivas como negativas en cuatro áreas principales:

1. *Salud de los suelos y productividad agrícola.* pH, disponibilidad de nutrientes, humedad y materia orgánica del suelo.
2. *Cambio climático.* El almacenamiento y fijación de carbono es probablemente el aspecto más directo y determinante de las iniciativas de mitigación del cambio climático basadas en el uso de biocarbón, una de las pocas estrategias de reducción de gases de efecto invernadero que permiten extraer el dióxido de carbono de la atmósfera. Existe el riesgo de que una pirólisis ineficaz y la degradación de la materia orgánica del suelo tras la aplicación generen emisiones de metano y óxido nitroso.
3. *Impacto social.* Los sistemas pueden repercutir en la energía, la salud, la economía y la seguridad alimentaria al reducir la presión sobre los ecosistemas forestales y la carga (principalmente para las mujeres) de recolectar materiales combustibles, además de aumentar el rendimiento y la resistencia de los cultivos como medida de

FIGURA 19. *Impacto del biocarbón sobre el ciclo del carbono (reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera)*



protección frente a la escasez de alimentos y el hambre. La mejora de las cocinas también puede ayudar a reducir la contaminación del aire interior, aunque su uso podría contribuir a la emisión de toxinas y a la inhalación de polvo y pequeñas partículas. La energía generada podría utilizarse para la refrigeración de vacunas, el bombeo de agua y la iluminación durante las horas de oscuridad.

4. *Otros usos de la biomasa.* La producción de biocarbón podría, entre otras cosas, ocupar tierras destinadas al cultivo de alimentos para la producción de combustible, reducir la superficie agrícola disponible para cultivos alimentarios y afectar directa e indirectamente al cambio de uso del suelo. Por ejemplo, deben sopesarse los costos y beneficios de dejar la biomasa *in situ* frente a utilizarla para producir biocarbón que posteriormente se aplicará al suelo.

## Mineralización del carbono

La mineralización es la transformación de la materia orgánica del suelo a través de un proceso que conduce a la formación de sales minerales, en las que los elementos fertilizantes son asimilables para las plantas. Esta transformación de los restos orgánicos pasa por diferentes etapas sucesivas:

- Una transformación química inicial que sufren los restos vegetales antes de caer al suelo.
- La acumulación y destrucción mecánica una vez sobre el suelo, en el que se van destruyendo sobre todo mecánicamente por la acción de los animales.
- Alteración química, etapa en la que se produce una intensa transformación de los materiales orgánicos y su mezcla e infiltración en el suelo, adquiriendo un color cada vez más negro y una constitución y composición absolutamente distintas de las originales.
- Los restos transformados se van desintegrando, difuminándose en el suelo y finalmente se integran con la fracción mineral, formando parte íntima del plasma basal del suelo. Por ejemplo, la lava basáltica se une químicamente con el CO<sub>2</sub> formando minerales sólidos

carbonatados, como el granito, que pueden guardar el CO<sub>2</sub> por millones de años. Muchos grupos de científicos han estado trabajando en la mineralización del carbono y han encontrado formas de acelerar la reacción natural, con lo cual se han atrapado unos 50 millones de toneladas del dióxido en los reservorios basálticos del océano Pacífico. Los reservorios se encuentran a unos 300 kilómetros de la costa y yacen bajo 2 600 metros de agua y otros 200 metros de sedimento, pero tienen poros que pueden llenar espacios del mineral con el potencial de mineralizar el dióxido en dos años.

## **Urge cambiar la manera en que se producen y consumen los alimentos**

Hoy en día los sistemas agrícolas han tenido éxito en proveer grandes volúmenes de alimentos en los mercados globales. La intensiva producción de los sistemas agrícolas ha causado una deforestación masiva, escasez de agua, pérdida de biodiversidad, pérdida de suelo y altos niveles de emisiones de gases invernadero. A pesar de que ha habido progresos significativos en los últimos años, la hambruna y la pobreza extrema persisten como retos globales a atender de inmediato. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) ha establecido una estrategia conocida como agroecología como una respuesta a la inestabilidad climática, ofreciendo una metodología con el propósito de satisfacer las necesidades alimenticias del futuro. La agroecología es un programa que simultáneamente aplica los conceptos ecológicos y sociales con el fin de diseñar y administrar los sistemas alimenticios y agrícolas. Trata de optimar las interacciones entre las plantas, los animales, los humanos y el medio ambiente. La innovación agroecológica se basa en el desarrollo de conocimiento combinado con la ciencia y el saber de los productores de alimentos. El sistema alimentario mundial debe transformarse urgentemente para abastecer en 2050 a una población de 10 000 millones de personas sin destruir el medio ambiente. Crear un futuro alimentario sostenible revela que se requerirá cerrar tres brechas: una “brecha alimentaria” de entre lo que se produjo en 2010 y los alimentos

TABLA 2. *Pérdidas en la producción agrícola*

África subsariana	Asia	América Latina	Cercano Oriente
Sequías 89%	Inundaciones 86%	Inundaciones 60%	Sequías 99%
Inundaciones 9%	Sequías 10%	Sequías 28%	Inundaciones 1%
Tormentas 2%	Tormentas 4%	Tormentas 11%	

que se necesitarán en 2050; una “brecha de tierra” de casi 600 millones de hectáreas. Lo anterior representa casi el doble del tamaño de la India tomando en cuenta la expansión prevista para 2050 del área de tierra agrícola global. Para cerrar las brechas, es necesario realizar ajustes significativos en la producción de alimentos, así como cambios en los patrones de consumo de la población. “En todos los niveles, el sistema alimentario debe estar vinculado a las estrategias climáticas, así como a la protección de los ecosistemas y la prosperidad económica”, dijo Andrew Steer, presidente y director ejecutivo del Instituto de Recursos Mundiales y ha mencionado que “la oportunidad de transformar el sistema alimentario no debe ser ignorada” (ver la Tabla 2). Recompensar a los agricultores por producir alimentos más diversos y nutritivos de una manera mucho más sostenible ayudará a aumentar sus ingresos, crear empleos, construir sociedades más sanas, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y apoyar la recuperación de los servicios ecosistémicos esenciales. Para disminuir el calentamiento es necesario desarrollar un “menú para un futuro alimenticio sustentable”, el cual, si se implementa en tiempo y escala, puede resultar tan benéfico que abarque hasta el año 2050:

1. Es necesario reducir el crecimiento en la demanda de alimentos y otros productos agrícolas, para lo cual una estrategia está orientada hacia la innovación de los productos, por ejemplo, la industria debe continuar incrementando sus inversiones en el desarrollo de sustitutos de la carne, gran consumidora de energía y agua.
2. Otra estrategia hace intervenir a la promoción y la mercadotecnia para alentar a la sociedad mediante campañas de información acerca de cambiar el tipo de dieta hacia una sustancialmente vegetal. Baste saber que, según la FAO, por cada kilogramo de proteína de



vacuno se emiten 295 kg de CO<sub>2</sub>, por la de los pequeños rumiantes 201 kg, por la de cerdo 55 kg y la de pollo 35 kg. La agricultura y los alimentos son componentes fundamentales de la herencia humana, por ello la tradición de la alimentación juega un papel central en la sociedad y da forma al comportamiento humano. En muchos casos, nuestro sistema de alimentación actual ha creado una ruptura entre los hábitos de alimentación y la cultura. Esta ruptura ha contribuido a una situación en donde el hambre y la obesidad coexisten, a pesar de que se produce lo suficiente para alimentar a toda la población. Casi 800 millones de personas en el mundo tienen hambre y 2 000 millones sufren de deficiencia de nutrientes, al tiempo que existe un crecimiento gigantesco de la obesidad y de enfermedades relacionadas con el tipo de alimentación; 1 900 millones de personas tienen sobrepeso o son obesos.

3. *Incrementar la producción de alimentos sin expandir la tierra agrícola*, lo que se traduce en impulsar la eficiencia natural de la agricultura, es decir, producir más alimento por hectárea, por animal, por kilogramo de fertilizante empleado y por litro de agua.
4. *Proteger y restaurar los ecosistemas naturales y limitar la desviación de los terrenos agrícolas a otras actividades*. La diversificación es fundamental en la transición agroecológica que asegure la alimentación y la nutrición al tiempo que se conservan, protegen y mejoran los recursos naturales. Desde una perspectiva biológica, la agroecología optimiza la diversidad de especies y recursos genéticos de varias maneras. Por ejemplo, los sistemas agroforestales organizan los árboles de diferentes tamaños y formas en diferentes niveles y estratos, incrementando la diversidad vertical del sistema. Eliminar simplemente la necesidad de una expansión de los terrenos agrícolas no impide la pérdida de carbono y ecosistemas, ya que la humanidad no sólo está expandiendo, sino además está desplazando la agricultura regional de los países desarrollados a los que están en vías de desarrollo. En los países en vías de desarrollo la demanda de alimentos es mayor dado que va aparejada con el crecimiento poblacional, esto a costa de transformar los bosques en áreas cultivables, lo cual no es ambientalmente deseable. Tómese en cuenta que la

conversión de los ecosistemas naturales tiende a producir más carbono por unidad de alimento y daña más a la biodiversidad que si se lleva a cabo la reforestación de un terreno abandonado en cualquier otra parte. El llamado Desafío de Bonn, lanzado por el gobierno alemán, es un esfuerzo mundial para restaurar para el año 2020 150 millones de hectáreas de tierra deforestada y degradada, y 350 millones de hectáreas para 2030 (ver la Figura 20). Hasta la fecha, un buen número de gobiernos, organizaciones y compañías han contribuido a este reto con más de 150 millones de hectáreas en proceso de restauración. La meta para el 2020 fue definida durante el evento de alto nivel organizado en el 2011 por el gobierno de Alemania en Bonn, donde se lanzó el desafío, y posteriormente fue avalada y ampliada para el 2030. El Desafío de Bonn es un vehículo de implementación de prioridades nacionales para impulsar la productividad de la tierra, mejorar la seguridad hídrica y alimentaria, conservar la biodiversidad y combatir la desertificación. El programa a la vez facilita la implementación de compromisos internacionales sobre cambio climático, biodiversidad y degradación de suelos. Alcanzar la meta de los 350 millones de hectáreas incluye la protección de cuencas hidrográficas, así como el aumento en el rendimiento de cosechas y productos forestales, y permitiría capturar anualmente el equivalente de hasta 1.7 Gt de dióxido de carbono.

5. El progreso en el sector pesquero entraña actividades orientadas a aumentar el tamaño y el número de los peces de las aguas continentales y supone, asimismo, conservar especies en peligro y aumentar la productividad de determinadas poblaciones ícticas particularmente valiosas (ver la Figura 21). Lo anterior se ha generalizado en todo el mundo, especialmente allí donde otras actividades han amenazado o eliminado especies importantes de peces o donde se desea aumentar las poblaciones. La repoblación, es decir, la introducción de peces puede tener por objeto aumentar el suministro de pescado, fomentar el crecimiento de determinadas especies o introducir nuevas especies. En algunas zonas, se retiran peces adultos pequeños de su medio natural para criarlos en estanques piscícolas a los que se añaden nutrientes y alimentos. Los peces de esos estanques son pe-

FIGURA 20. Programa de restauración de tierras deforestadas

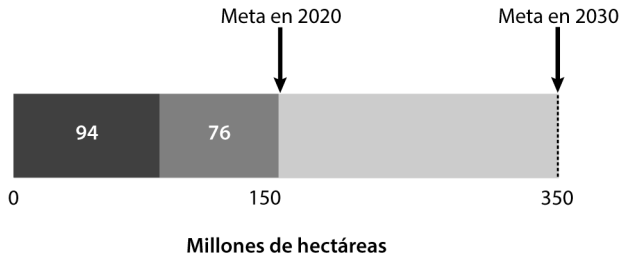


Figura 21. La mejora de las pesquerías tiene como propósito aumentar el tamaño y el número de los peces



En 2016, 88% de la producción pesquera total (151 millones de toneladas) se utilizaron para consumo humano directo. De hecho, la tasa de crecimiento anual de pescado disponible para consumo humano ha superado a la de carne de todos los animales terrestres.

ces “cultivados”. Es posible modificar los peces genéticamente, por ejemplo, seleccionando los mejores ejemplares para su reproducción o manipulando sus cromosomas para favorecer un mejor crecimiento o la resistencia a las enfermedades. Luego, se procede a recolectar los peces cultivados o son devueltos a las aguas de las que proceden.

6. *Disminuir las emisiones por actividades agrícolas.* Las emisiones agrícolas procedentes de la producción agropecuaria llegó a más de

5 300 millones de toneladas en 2011, un aumento de 14%. El incremento se produjo principalmente en los países en desarrollo debido a la expansión del total de la producción agrícola. Las estimaciones sobre los gases de efecto invernadero muestran que las emisiones procedentes de la agricultura, la silvicultura y la pesca se han duplicado en los últimos 50 años y podrían aumentar en 30% para 2050 si no se lleva a cabo un esfuerzo mayor para reducirlos. La mayor fuente de emisiones de gases invernadero provenientes de la agricultura, es la fermentación entérica —el metano producido durante la digestión y expulsado al eructar—, la cual representa 39% de las emisiones totales del sector. Manipulando la composición de los nutrientes en la dieta de los rumiantes se puede reducir directamente el metano producido. Por ejemplo, una alta proporción de concentrados (basados en granos) en la dieta tiende a reducir la población de protozoarios y reduce el pH, con lo que decrece el metano producido por unidad de alimento proporcionado. Los procesos biológicos en los arrozales, que generan metano, representan 10% del total de las emisiones de la agricultura. Se deben, por tanto, implementar medidas para incrementar la productividad de los rumiantes y reducir el uso de pastizales, ya que con ello se reduce la emisión de metano, aunado a que se produce más leche y carne por kilogramo de alimento.

## **Efectos del cambio climático sobre la salud humana**

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) nos informa que el clima y las condiciones meteorológicas afectan de muchas formas a la salud y son varias las razones por las que no resulta sencillo determinar todo el impacto que pueden tener. En primer lugar, la salud de cada persona responde a fenómenos climáticos que tienen diferente distribución temporal —desde variaciones diarias y estacionales hasta fluctuaciones interanuales— y estos nexos causales interconectados pueden acumularse o anularse parcialmente entre sí. En segundo lugar, a menudo resulta difícil evaluar qué respuestas pueden desvincularse de otros factores y atribuir-

se exclusivamente al clima. En tercer lugar, el lapso que transcurre entre la exposición y el efecto torna difícil o imposible determinar si hay algún vínculo.

### ***Efectos directos del cambio climático sobre la salud humana***

Las olas de calor son periodos en los que las temperaturas son más altas que el promedio y pueden durar desde días hasta meses. Por lo tanto, un aumento de 2 °C en una zona quizá sea considerado normal, mientras que en otra esa temperatura puede resultar excepcionalmente cálida. Las olas de calor pueden provocar estrés por calor, lo que aumenta la incidencia de las enfermedades relacionadas con el calor, genera alergias y enfermedades respiratorias, disminuye la tolerancia química y provoca agotamiento. Además, los episodios de olas de calor han aumentado las tasas de ingresos en los servicios de urgencias por trastornos mentales (trastornos del estado de ánimo, ansiedad y demencia) y la mortalidad asociada a enfermedades mentales ya diagnosticadas. Los efectos pueden ser particularmente perjudiciales para las personas que trabajan al aire libre, ya que la exposición a las temperaturas extremas reduce las funciones cognitivas y aumenta el riesgo de lesiones o genera descuidos que comprometen la seguridad laboral.

### ***Enfermedades transmitidas por los alimentos y por el agua***

El clima influye en la proliferación, la supervivencia, la persistencia, la transmisión y la virulencia de los microbios patógenos de los alimentos y del agua. Se considera que los factores climáticos están asociados al aumento de la contaminación por bacterias, parásitos, virus como la hepatitis y la floración de algas nocivas. Las enfermedades digestivas y las enfermedades transmitidas por el agua están vinculadas a las precipitaciones abundantes y las inundaciones. El cambio climático también puede aumentar las enfermedades de transmisión alimentaria. También hay algunas toxinas transmitidas por los alimentos que quizá proliferen al subir

la temperatura, como la aflatoxina, potente carcinógeno hepático humano y hongo habitual del maíz, el cacahuete, los frutos secos y la semilla de algodón. Las temperaturas cálidas también promueven la floración de algas nocivas que liberan grandes cantidades de ficotoxinas, las que a su vez contaminan los moluscos y crustáceos.

### ***Enfermedades transmitidas por vectores***

Es probable que el cambio climático amplíe la distribución geográfica de las enfermedades transmitidas por vectores a altitudes mayores y extienda la temporada de transmisión en esas latitudes, cambios que probablemente incidan en varias enfermedades que circulan por la Región de las Américas, como el dengue, la enfermedad del Zika, el chikunguña, la fiebre amarilla, la fiebre del Nilo Occidental, la malaria, la leishmaniasis, la encefalitis transmitida por garrapatas, la beriliosis de Lyme, la rickettsiosis maculosa y la fiebre del Valle del Rift. Resulta complejo proyectar la prevalencia de las enfermedades transmitidas por vectores debido a que depende de un gran número de factores —ambientales, biológicos y socioeconómicos— y está relacionada con las estrategias de vigilancia y control ya instituidas. Es necesario tener en cuenta las nuevas zonas de transmisión posible en los sistemas de vigilancia y alerta anticipada, la capacitación, los planes y estrategias de control y la preparación de los sistemas de salud.

### ***Enfermedades respiratorias y alérgenos***

Los contaminantes climáticos de vida corta son importantes no sólo en relación con el cambio climático, sino también porque son responsables de muchos de los efectos sobre la salud causados por la contaminación atmosférica. El término *contaminante climático de vida corta* denomina a aquellas sustancias contaminantes que persisten corto tiempo en la atmósfera, pero que, a pesar de su transitoriedad, son responsables de 40 a 45% del recalentamiento del planeta (el porcentaje restante es consecuencia del CO<sub>2</sub>, que puede persistir en la atmósfera cientos de años) porque sus partículas se generan en gran abundancia y absorben más calor que el mismo volumen de CO<sub>2</sub>. Entre estos contaminantes se encuentran el car-

bono negro (es decir, el hollín) —partículas muy finas que son producto de la quema incompleta de combustibles y biomasa— y el metano, el ozono y los hidrofluorocarburos. Las partículas de los contaminantes de vida corta que tienen un diámetro de 10 micrómetros (PM10) o menos (por ejemplo, PM2.5) son de particular interés para la salud porque penetran en el torrente sanguíneo y en los pulmones a un nivel profundo, y causan enfermedades cardiovasculares y respiratorias. De los distintos tipos de contaminantes de partículas finas, el carbono negro ha recibido mucha atención debido a que no sólo causa problemas de salud directos si es inhalado, sino que sus partículas pueden recorrer grandes distancias y oscurecer los mantos de hielo, lo que aumenta su absorción del calor y, a su vez, acelera su derretimiento. La combustión de carburantes en edificios residenciales y comerciales y en el transporte representa aproximadamente 80% de las emisiones antropogénicas de carbono negro, y casi dos terceras partes de las partículas PM2.5 generadas por las estufas o cocinas domésticas de biomasa corresponden a carbono negro. El cambio climático también puede exacerbar las alergias porque potencia la producción de polen y otros alérgenos ambientales. El cambio climático y el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> modifican la producción, la medida de la magnitud con que cada alérgeno particular afecta a las personas, la distribución y la estacionalidad de los aeroalérgenos.

### ***Desplazamientos forzados y salud mental***

La migración de las personas presenta una relación causal con el estrés por aculturación y, en ocasiones, es uno de los factores desencadenantes de los trastornos psiquiátricos. Las personas que se ven obligadas a migrar después de los desastres son más propensas a sufrir trastornos psiquiátricos que aquellas que migran por voluntad propia. Los efectos de la migración forzada se perciben tanto a nivel individual como de la comunidad: los trastornos de salud mental comprenden desde depresión, ansiedad y estrés patológico hasta comportamientos suicidas. Se han observado tasas altas de intentos de suicidio y estrés por aculturación específicamente en los agricultores que fueron objeto de desplazamiento forzado.

## Adaptación de las ciudades

Las ciudades enfrentan retos climáticos y ambientales muy significativos, de los que podemos apuntar los siguientes:

- El efecto de islas de calor urbanas. Ocurren cuando una ciudad experimenta temperaturas más calientes que las zonas rurales cercanas a ella, que obviamente depende de qué tanto calor absorbe y lo mantiene la superficie, lo que requiere un enfriamiento limitado mediante vegetación y superficies permeables. Los materiales como el asfalto, el acero y los ladrillos, en general son de colores oscuros (negro, café, gris). Los objetos oscuros absorben todo el espectro de la luz y la convierten en calor, contrario a los objetos blancos que la reflejan.
- Las ciudades situadas en zonas costeras de baja elevación con hundimiento de la superficie pueden ser afectadas por la elevación del nivel del mar y las tormentas, mientras que las ciudades de climas calurosos pueden ser afectadas por ondas de calor persistentes y más severas. En adición a los impactos directos en las ciudades, el cambio climático también afecta indirectamente a las ciudades por las áreas o sistemas que las rodean, ejemplo de ello son los siguientes:
  - La calidad y cantidad de agua que llega a la ciudad puede reducirse si aumentan las sequías, particularmente en los lugares en las zonas de aprovisionamiento del líquido, lo cual pone en peligro el aprovisionamiento de agua para beber o la reducción en la producción agrícola que afecta la seguridad alimentaria.
  - La transmisión de energía y su distribución puede saturarse debido al incremento de incidencias o duración de las ondas de calor del verano, que provoca una mayor demanda de energía de los sistemas de enfriamiento del aire.
  - Las ciudades pueden experimentar también una mayor migración de habitantes de las zonas rurales, presionados por las sequías o climas extremos.



Conforme la población de las ciudades se incrementa una de las prioridades más importantes que se debe considerar es prevenir el uso crítico de la tierra (por ejemplo, las construcciones residenciales o almacenes de venta de productos) y las inversiones en infraestructura en terrenos susceptibles de inundarse, los situados en colinas o a lo largo de ríos.

Es por tanto muy importante producir mapas de las zonas vulnerables, entender las presiones del desarrollo e implementar normatividad estricta en las inversiones de infraestructura que alienten la expansión urbana en áreas seguras.

## **El cuidado del agua**

El uso del agua doméstica ha crecido en 600% desde los últimos 50 años, en algunos países ese crecimiento se debe al riego de jardines. Un cuarto de la población mundial se enfrenta a una situación crítica en cuanto al aprovisionamiento de agua, al tiempo que 80% del agua disponible se extrae cada año. Desde la década de 1960 la agricultura es mayoritariamente la usuaria de agua, aunque la velocidad de consumo respecto a otros sectores ha disminuido. De todo ello resulta que debemos desacoplar el agua doméstica de su uso para el crecimiento económico, algunas ideas para hacerlo pueden ser las siguientes:

- Varias compañías evalúan el uso del agua durante todo el ciclo de vida de la producción de sus bienes de consumo, particularmente si dichos bienes son empleados en los hogares, se trata de disminuir el requerimiento del preciado líquido. Lo anterior incluye jabones para la vajilla, shampoos y acondicionadores que no empleen agua, etcétera.
- La regulación debe aplicarse con leyes específicas de los equipos que emplean agua en los hogares, muchos países tienen estándares de energía y uso eficiente del agua que deben certificar ante las autoridades competentes.
- La educación de los usuarios es fundamental, crear nuevos productos no conduce necesariamente a un cambio de hábitos de la gente, esos hábitos son muy difíciles de cambiar.

- Hay que considerar la llamada agua embebida, aquella que generalmente proviene del consumo de alimentos, un ejemplo: medio kilogramo de carne de res requiere más de 7000 litros de agua en su producción, más de 50 veces la requerida para medio kilogramo de papas y, por otra parte, tómesese en consideración que la energía empleada en las viviendas, escuelas y oficinas, la mayoría se origina en plantas de energía térmica que requieren de agua para enfriarse.

### III. Mitigación

Cuando se trata de detener el cambio climático para prevenir los impactos que causa en los diferentes sistemas del planeta, los seres humanos aplican dos tipos de medidas: la adaptación y la mitigación. La mitigación involucra reducir el flujo de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ya sea reduciendo las fuentes de emisión de dichos gases (por ejemplo, el quemado de combustibles fósiles para generar electricidad, calor o emplearse en el transporte) o bien incrementando los lugares en donde se pueden atrapar y guardar (por ejemplo, los océanos, bosques y suelos). La meta de la mitigación es impedir la creciente interferencia humana en los sistemas climáticos y, como menciona el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC),

[...] estabilizar los niveles de gases invernadero en un lapso suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático y se garantice que la producción de alimentos no es amenazada, permitiendo que el desarrollo económico continúe de una manera sustentable.

Por lo tanto, la mitigación lleva a cabo acciones que se implementan para disminuir la emisión de gases, mientras que la adaptación se basa en reducir la vulnerabilidad de los efectos por el cambio climático. La ambiciosa reducción de emisiones modelada para la mayoría de las vías de emisiones no son suficientes para limitar la elevación de la temperatura. Dentro de esas vías, es necesario contemplar formas de remover el dió-

xido de carbono a escala de miles de millones de toneladas por año en todo el mundo. La intención de la remoción del carbono es almacenar el CO<sub>2</sub> en plantas, suelos, océanos, así como en formaciones y productos no biológicos o en formaciones geológicas (por ejemplo, materiales de construcción), aumentando así la transferencia neta del carbono de la atmósfera que se lleva a cabo de manera natural como parte del ciclo de carbono.

## Estrategias para el precio del carbono

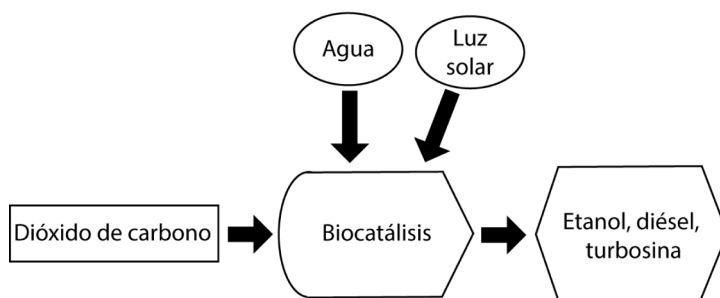
Muchas de las tecnologías emergentes requerirán inversiones sustantivas para continuar el desarrollo tecnológico, habilitando infraestructura y mercados, así como inversión en conocimiento científico para entender los beneficios climáticos y los efectos secundarios que puedan provocar. En última instancia, las tecnologías de remoción del carbono dependerán de un soporte público sostenido, incluyendo financiamiento. Darle un precio al carbono es un método para reducir sus emisiones que emplea mecanismos del mercado para transferir el costo de éstas a quien las provoca. El principal objetivo es desalentar el uso del dióxido de carbono emitido por los combustibles fósiles. Un aspecto fundamental del mecanismo está basado en el principio de “el que contamina, paga”. Si se pone un precio al carbono la sociedad puede señalar a los emisores como responsables de los serios daños que provocan los gases de efecto invernadero, con lo cual se crean incentivos para que los contaminadores reduzcan sus emisiones.

## Ingeniería fotosintética

Para generar combustibles a partir de productos vegetales o de deshecho es necesario hacer uso de procesos biocatalíticos. El término *biocatálisis* se refiere al empleo de células o sus enzimas aisladas para promover reacciones que conducen a la obtención de compuestos que satisfacen numerosas necesidades humanas. La catálisis es un proceso por el cual se aumenta la

velocidad de una reacción química utilizando para ello un catalizador, el cual interviene en las reacciones y elige perfectamente las moléculas que van a combinarse. La bioquímica para estos procesos se basa en el uso de microorganismos vivos, ya sean hongos o bacterias que convierten la biomasa en formas más útiles de emplearse. La utilización de células o enzimas ha demostrado su eficacia en la síntesis de fármacos, herbicidas, insecticidas y otros productos químicos, o en la industria textil y de detergentes. Ello se debe a que representan una alternativa más eficiente y a la vez más ecológica a la química sintética tradicional, ya que los procesos que catalizan transcurren a través de reacciones en medios más respetuosos con el ambiente. En el corazón de estos procesos se encuentran microorganismos fotosintéticos que cuando se les alimenta de dióxido de carbono, en lugar de emplear la fotosíntesis para producir nuevas células, producen combustibles (ver la Figura 22). La celulosa es la fuente de carbono renovable más abundante de la Tierra. Se ha estimado que la vida media de la celulosa es de millones de años, indicando que la hidrólisis enzimática es clave en la degradación de este polímero. Los hongos son reconocidos como agentes de descomposición de la materia orgánica en general y de la celulosa en particular. Adicionalmente, las conversiones termoquímicas implican el calentamiento controlado y la descomposición de la masa en subproductos líquidos, gaseosos y sólidos susceptibles de convertirse en un combustible líquido para el transporte, ya que al volverse a combustionar generará otra vez dióxido de carbono, por lo cual debe volverse

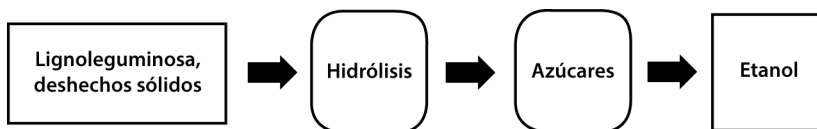
FIGURA 22. Conversión directa del dióxido de carbono por biocatálisis



a recuperar. La fermentación alcohólica tiene como finalidad proporcionar energía a los microorganismos unicelulares (levaduras) en ausencia de oxígeno, produciendo alcohol y  $\text{CO}_2$  como desechos de la fermentación. La humanidad emplea la fermentación alcohólica desde tiempos inmemoriales para la elaboración de cerveza y del vino. Los griegos atribuían el descubrimiento de la fermentación al dios Dionisio. En 1815 el investigador francés Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) fue el primero en determinar una reacción de fermentación obteniendo etanol a partir de glucosa, a pesar de este logro los fundamentos de la fermentación alcohólica eran completamente desconocidos. Hasta 1896 se había venido aceptando que el proceso de la fermentación requería células vivas e intactas de levadura. El químico alemán Eduard Büchner (1860-1917) comprobó la falsedad de este punto de vista y demostró que la fermentación alcohólica se debe a la acción química causada por una sustancia segregada por la propia levadura; esta sustancia, descubierta por Büchner en 1897, se llamó zimasa, y los derivados químicos de origen y acción fisiológica similar se llaman enzimas. Por este trabajo Büchner recibió en 1907 el Premio Nobel de Química. Las ventajas medioambientales y económicas del etanol renovable reducen la dependencia de los combustibles fósiles.

El aumento de la producción de alcohol en el mundo está aparejado con el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten obtenerlo a partir de residuos agrícolas, maderables, desechos sólidos y de todos los materiales que contengan celulosa y hemicelulosas. Aunque los procesos son costosos en la actualidad, los avances en la biotecnología deben llevar a una disminución sustancial del costo de conversión de estos materiales a etanol. La aplicación a gran escala de bioetanol como un combustible de transportación puede contribuir sustancialmente a la reducción de la emisión

FIGURA 23. Obtención de alcohol a partir de lignocelulosa y otros desechos

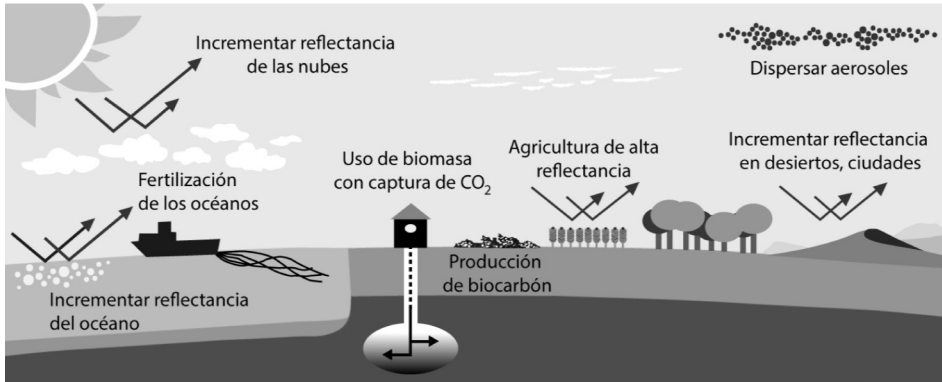


de  $\text{CO}_2$  (ver la Figura 23). Tómese en consideración que la gasolina es un producto que contiene hidrocarburos de cuatro a 12 átomos de carbono. Esto trae como consecuencia que en el mejor de los casos si la combustión es completa, entonces se generan de cuatro a 12 moléculas de  $\text{CO}_2$ , mientras que con el etanol serían únicamente dos.

## Geoingeniería

La manipulación a gran escala del medio terrestre, conocida como geoingeniería, puede ofrecer soluciones para enfriar el planeta y reducir los niveles de dióxido de carbono de la atmósfera. Pero los científicos son conscientes de que estas tecnologías aún se encuentran en sus primeras fases de desarrollo y no han sido probadas a escala global. Según Scott Barret, economista de la Universidad de Columbia, debido a la “insuficiente” acción por parte de los gobiernos para reducir emisiones ha llegado el momento de contemplar alternativas consideradas hasta ahora como ciencia ficción.

Aunque interferir deliberadamente en la naturaleza implica grandes riesgos, algunos investigadores creen que, si las concentraciones de carbono en la atmósfera alcanzan un nivel crítico, la geoingeniería podría ser la única manera de tomar el control del clima. Otros expertos creen que los esfuerzos deberían concentrarse en las formas conocidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo claro es que no se disminuirá la emisión de carbono lo suficientemente rápido para prevenir los cambios climáticos, sin embargo, hay maneras de enfriar el planeta más rápidamente y comprarnos algo de tiempo para dejar de emplear los combustibles fósiles. Tradicionalmente, la geoingeniería ha incorporado dos acciones muy diferentes entre sí: por una parte, extraer el dióxido de carbono de la atmósfera de manera que atrape menos luz solar y, por otra parte, alejar la luz solar del planeta de manera que no toda se absorba. La geoingeniería solar más conocida consiste en dispersar partículas en la estratósfera que formen aerosoles para refractar la luz solar (ver la Figura 24).

FIGURA 24. *Geoingeniería para contrarrestar el efecto invernadero*

## Aerosoles

Un aerosol es una suspensión coloidal de partículas presentes en un gas. Una tormenta de polvo o la dispersión de cenizas volcánicas pueden generar estos aerosoles. Los críticos de la geoingeniería han argumentado que una modificación significativa de la insolación solar total conducirá a consecuencias indeseables, por ejemplo, se menciona que el dióxido de carbono atrapa el calor tanto en el ciclo del día y como en el de la noche, mientras que una reducción de la insolación sólo se sucederá en el ciclo diurno.

Lo anterior tiene un gran impacto en la química atmosférica, específicamente sobre la capa de ozono. En los últimos años la capa de ozono, manto superficial que resguarda a nuestro planeta de la radiación generada por los rayos ultravioleta, se ha deteriorado cada vez más, ocasionando severos daños al clima debido a la emisión de gases contaminantes. Aunque la concentración de gases de efecto invernadero sea la principal causa del calentamiento global, éste no es el único factor que interviene en el cambio climático. Hay aerosoles, como el carbón negro y el mineral en polvo con alto contenido en hierro, que se comportan de manera similar a los gases de efecto invernadero, pudiendo contribuir a aumentar la temperatura del planeta. Además, existen aerosoles (como las cenizas derivadas de una erupción volcánica o de un fuego intenso) que reflejan y dispersan hacia el exterior la luz solar, provocando un enfriamiento planetario que



tendría diversos efectos negativos para el medio ambiente y para la salud humana. Por otra parte, poco se conoce sobre la toxicidad de algunos aerosoles candidatos que se han propuesto y no existe consenso de cuáles deben ser los niveles aceptables de exposición a ellos. Adicionalmente, el efecto de dicho procedimiento será más pronunciado en el ecuador, lo que conduce a menores gradientes de temperatura respecto a latitud, con consecuencias impredecibles sobre las corrientes marinas y, en general, sobre el clima global.

## **Métodos para alejar la luz del planeta**

Estos métodos proponen estacionar lentes o espejos en el espacio para desviar la radiación solar antes de que llegue a la Tierra. El concepto es bastante simple: crear un escudo de partículas protectoras en la atmósfera que hagan rebotar la radiación solar de nuevo hacia el espacio. Sería como polarizar el vidrio de un carro o untarse bloqueador para ir a la playa. Según el astrónomo Roger Angel, de la Universidad de Arizona, podríamos solucionar parte del problema del calentamiento global colocando millones de espejos en el espacio. Estos espejos se ubicarían entre la Tierra y el Sol, bloqueando de forma parcial su luz. Al quedar nuestro planeta bajo la “protección” de esta especie de eclipse parcial artificial, su temperatura descendería. Por supuesto, ésta es una solución que difícilmente se pueda poner en práctica dentro de un plazo razonable. Además, es prácticamente imposible montar semejante escudo en un plazo menor al que necesitamos para extinguirnos por el calentamiento global. A pesar de ello, la idea es perfectamente viable desde el punto de vista técnico. Sólo nos falta la tecnología suficiente para poder comenzar a enviar espejos al espacio hoy mismo.

## **Modificaciones del albedo superficial**

La Tierra refleja parte de la radiación que recibe del Sol a través de tres actores principales: la atmósfera, las nubes y la superficie terrestre. La radiación reflejada por la superficie terrestre es el albedo. Así pues, se puede

decir que el albedo es la cantidad de radiación solar devuelta a la atmósfera tras chocar con la superficie terrestre. Las modificaciones del albedo tienen como propósito reflejar la luz hacia el espacio, modificando las superficies terrestres como los desiertos, los terrenos agrícolas o el hielo. La palabra albedo se refiere a la reflectividad de una superficie, no tiene unidades y se describe como un porcentaje o como una fracción de un número entre cero y uno. La nieve, por ejemplo, tiene un albedo de alrededor de 80%, lo que significa que la radiación sobre los campos nevados se refleja mayoritariamente hacia la atmósfera. En la Tabla 3 se hace una comparación entre el material de la superficie sobre la que se refleja la luz solar y su respectivo efecto albedo. Pues bien, dependiendo del color que tiene la superficie sobre la que inciden los rayos solares se reflejará o se absorberá mayor cantidad. Para colores oscuros, la tasa de absorción de rayos solares es mayor a menor cantidad de energía reflejada. El negro es el color que más cantidad de calor es capaz de absorber. El albedo de la Tierra es 0.39 y afecta a su temperatura de equilibrio. El efecto invernadero es capaz de bajar el albedo de la Tierra atrapando la radiación infrarroja, originando un calentamiento global. Por el contrario, colores más claros son capaces de reflejar mayor cantidad de radiación solar. En este caso, el blanco es el que tiene una tasa de absorción menor. Ésta es la razón por la que antes en los pueblos sólo se veían casas de color blanco. Es una forma de aislar la casa de las altas temperaturas del verano por una menor absorción de calor. Se han sugerido varias propuestas en las que el desarrollo de cultivos que reflejen más luz (ya sea por modificación genética de cultivos o variedades naturales con alto albedo), podrían enfriar la atmósfera al enviar más radiación solar al espacio. A continuación describimos algunas de las propuestas para modificar el albedo.

### ***Cobertura del desierto***

Hace más de una década se propuso diseñar un sistema que permitiera cubrir una porción significativa de los desiertos de la Tierra con polietileno blanco para reflejar la luz solar y disminuir la temperatura superficial. Quienes hoy en día proponen tales proyectos no toman en consideración que los desiertos contienen plantas, animales y humanos, por lo que sería

TABLA 3. *Porcentaje de albedo de distintas superficies*

<i>Superficie</i>	<i>Albedo (%)</i>
Agua	5 a 70
Arena	20 a 45
Bosque	5 a 15
Carretera	5 a 10
Cemento	20
Cultivos	10 a 25
Hielo	20 a 40
Nieve	80
Nube densa	75

difícil imaginar cómo continuaría la vida de un ecosistema cubierto de plástico. El polvo del desierto, que quedaría cubierto por el plástico, es esencial para el clima global, ya que influencia la radiación solar, la formación de nubes y hasta el enfriamiento del océano.

### ***Cobertura del hielo***

De manera similar a cubrir el desierto, se ha propuesto el revestimiento del hielo del Ártico posiblemente con una malla hecha con nanotecnología o bien con capas de vidrio. Con ello se tendría “una banda de reflectancia” que aislaría rápidamente los copos de nieve y glaciares empleando, entre otras cosas, bolsas de basura hechas de plástico. Los posibles efectos negativos que dichas acciones pueden tener sobre el clima, la temperatura del agua y la biodiversidad parece que no han sido considerados.

### ***Pintar montañas, techos y pavimentos***

En el año 2010 el Banco Mundial otorgó un premio a un grupo que planteaba pintar de blanco la cima de una montaña situada en el Perú. Tal propuesta tendría efectos negativos sobre los ecosistemas frágiles, la flora y la fauna, por lo que la idea fue descartada. Sin embargo, se ha promovido cu-

brir los techos de los edificios y el asfalto de las calles con pintura blanca, lo que podría tener un efecto de enfriamiento local.

### ***Eliminación de los bosques boreales***

Otra idea adaptada de modelos de ingeniería pregona eliminar del planeta las áreas que quedan de bosques boreales (por ejemplo, en Rusia y Canadá) con el fin de incrementar la reflexión. Los estudios realizados indican que habría efectos negativos a nivel local, ya que se puede destruir la productividad del ecosistema subártico afectando a los pájaros migratorios y a otras especies, así como a plantas y a personas que dependen de ellos.

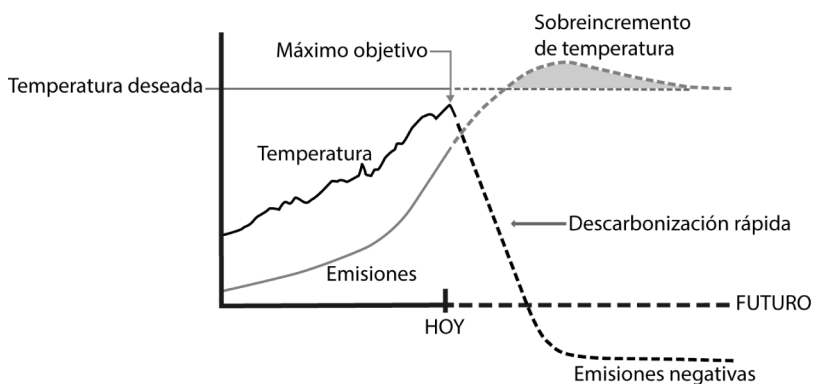
## **Tecnologías de emisiones negativas**

Antes de adentrarnos en la definición y usos de las emisiones negativas de CO<sub>2</sub> en el ambiente, debemos mencionar brevemente aquellas emisiones definidas como renovables, es decir, fuentes de energía basadas en la utilización de recursos naturales: el sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal. Se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles, más bien recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente. Las energías renovables podrían proporcionar más de 80% del consumo de la energía del mundo entero en 2050, esto podría significar una reducción de 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero, según un informe elaborado por el IPCC. Dicho organismo presentó una evaluación de los aspectos científicos, tecnológicos, ambientales, económicos y sociales de la contribución de seis fuentes de energía renovable a la mitigación del cambio climático. Las fuentes evaluadas fueron la bioenergía, energía solar directa, energía geotérmica, hidroenergía, energía del océano y energía eólica. Éstas se aprovechan en la actualidad para la generación de energía eléctrica, térmica y/o mecánica, sea de modo descentralizado o al interior de grandes redes de energía. Las tecnologías de la bioenergía son muy diversas y su grado de madurez técnica varía considerablemente. Algunas ya comercializadas son las calderas de pequeño o gran tamaño, los sistemas

de calefacción central por gránulos o la producción del etanol a partir del azúcar y del almidón. Los proyectos de la bioenergía dependen generalmente del combustible disponible a nivel local y regional, aunque en los últimos tiempos parece haber indicaciones de que la biomasa sólida y los biocombustibles líquidos están cada vez más presentes en el comercio internacional. Las tecnologías de la energía solar directa explotan la energía irradiada por el Sol para producir electricidad mediante procesos fotovoltaicos o mediante la energía por concentración solar, generando energía térmica (con fines de calefacción o refrigeración, y por medios pasivos o activos) para usos de iluminación directa y, posiblemente, para producir combustibles para el transporte o de otra índole. La energía solar es variable y, en cierta medida, impredecible, aunque en determinadas circunstancias el perfil temporal de la producción de la energía solar está bastante correlacionado con la demanda de energía. El almacenamiento de energía térmica ofrece la posibilidad de mejorar el control de la producción en algunas tecnologías, como la energía por concentración o la calefacción solar directa. La energía geotérmica explota la energía térmica accesible del interior de la Tierra. En esta modalidad, el calor es extraído de reservorios geotérmicos mediante pozos, o por otros medios. Los reservorios que se hallan suficientemente calientes y permeables en estado natural se denominan “reservorios hidrotérmicos”, mientras que otros, cuya temperatura es suficientemente elevada, pero que es necesario mejorar mediante estimulación hidráulica, se denominan “sistemas geotérmicos mejorados”. Una vez en la superficie es posible utilizar fluidos a distintas temperaturas para generar electricidad o destinarlos directamente a aplicaciones alimentadas de energía térmica, en particular la calefacción de áreas residenciales. La energía hidroeléctrica explota la energía del agua en su caída, principalmente para generar electricidad. Los proyectos de energía hidroeléctrica pueden consistir en presas con embalses, proyectos a lo largo de un río o en mitad de la corriente y pueden abarcar todo tipo de escalas. Esta diversidad confiere a la energía hidroeléctrica capacidad para responder a necesidades urbanas centralizadas y en gran escala, pero también a las necesidades rurales descentralizadas. Las tecnologías de la energía hidroeléctrica se encuentran en fase avanzada. La energía oceánica se obtiene a partir de la energía potencial, cinética, térmica o química del

agua de mar, que puede ser transformada para suministrar electricidad, energía térmica o agua potable. Es posible utilizar tecnologías muy diversas: muros de contención de la amplitud de la marea, turbinas submarinas para las corrientes de marea y oceánicas, intercambiadores de calor para la conversión de energía térmica oceánica, y una gran diversidad de dispositivos que permiten controlar la energía del oleaje y los gradientes de salinidad. Si se exceptúan los muros de contención de la marea, las tecnologías oceánicas se encuentran en fase de demostración o de proyecto piloto, y muchas de ellas deben pasar todavía por una fase de investigación y desarrollo. En cierto sentido llegamos muy tarde. Aunque consiguiéramos detener súbitamente las emisiones excesivas de dióxido de carbono, no podríamos mitigar los efectos de los gases de efecto invernadero. El calentamiento global es un hecho, así que sólo nos queda adaptarnos o buscar soluciones más... creativas. En una nueva economía del carbono que crezca y sea próspera, es necesario generar la tecnología que capture y confine más carbono del que emite. Con el fin de poder estabilizar el calentamiento global a un cierto nivel, las emisiones del CO<sub>2</sub> deben ser eliminadas, pues reducir las exclusivamente no es suficiente para mitigar el cambio climático. La excedencia en el incremento en la temperatura representa un nivel superior a un valor especificado de calentamiento motivado por aumento de los gases invernadero. Cuanto mayor es el valor de aumento, alcanzar los valores de 2100, removiendo el dióxido de carbono, será cada vez más difícil. Lo anterior conduce a implementar rápidamente sistemas de remoción del CO<sub>2</sub>, tecnologías de cero emisiones de contaminantes en las que el gas es atrapado en la atmósfera y es almacenado en sitios terrestres, en nuevos productos o bien en los océanos. Los escenarios revisados por los científicos muestran que en ausencia de medidas adicionales para reducir los gases de efecto invernadero el planeta se dirige a una trayectoria en la cual la temperatura promedio global sería de 3.7 a 4.8 °C mayor a la que existía en la época preindustrial. Las consecuencias de tales temperaturas serían catastróficas (ver la Figura 25). Es obvio que mientras más dure la excedencia y persista por largo tiempo, más difícil será retornar a los niveles deseados, por lo que hay que incrementar rápidamente las tecnologías de emisiones negativas. La solución es eliminar de la atmósfera suficientes gases de efecto invernadero para balancear aquellos imposibles

FIGURA 25. *Importancia de las emisiones negativas para mitigar los incrementos de temperatura*



de eliminar, con lo cual se consiga alcanzar un valor neto de cero. Si las emisiones negativas balancean a las positivas por un cierto periodo, el calentamiento global debería estabilizarse. Hoy en día el único gas donde es posible aplicar el concepto de emisiones negativas en una escala aceptable es el dióxido de carbono. El término de *emisiones negativas* está presente tanto en la discusión de las tecnologías para remover el dióxido de carbono como en las trayectorias que dichas emisiones tendrán en el largo plazo. Vale la pena hacer notar que para determinar si se ha realizado con éxito una reducción negativa de emisiones es necesario conocer la fuente de captura, el método empleado y la conversión y disposición de dióxido de carbono. Por ejemplo, si el gas capturado se emplea para fabricar combustibles sintéticos, el proceso, a fin de cuentas, volverá a generar  $\text{CO}_2$  que irá a la atmósfera cuando se combustione. Por el contrario, si el  $\text{CO}_2$  se confina en una formación geológica o se aísla en productos de larga vida, entonces se está hablando de tecnologías de emisiones negativas. Eliminar el  $\text{CO}_2$  atmosférico no es una idea nueva, pues siempre se ha considerado que la mitigación incluye tanto la reducción de emisiones como la eliminación. Lo que es nuevo es la escala, la naturaleza y la urgencia que se está considerando, y lo que esto significa para su gobernanza efectiva.

Las grandes fuentes puntuales de  $\text{CO}_2$  comprenden las instalaciones de combustibles fósiles o de energía de la biomasa de grandes dimensiones,

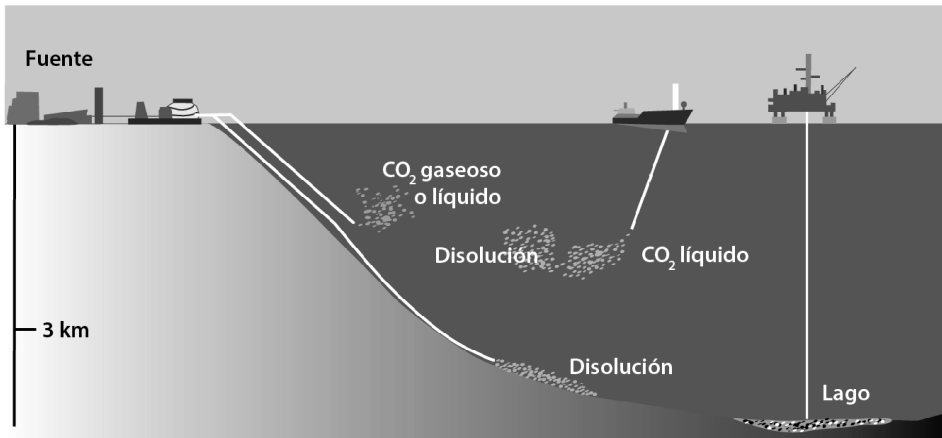
principales industrias emisoras de CO<sub>2</sub>, la producción de gas natural, las plantas de combustible sintético y las plantas de producción de hidrógeno alimentadas por combustibles fósiles. Existen diferencias importantes entre la reducción de CO<sub>2</sub> y la no emisión, puesto que algunos grupos temen que centrar la atención en la eliminación a gran escala crea un riesgo moral que podría disminuir la reducción de emisiones, pero la reducción y la remoción de CO<sub>2</sub> no son sustitutos ni complementos. La implementación de estos procesos a gran escala podría requerir grandes cantidades de tierra, energía o agua y competir con la producción de alimentos u otras actividades. Algunas tecnologías podrían tener efectos secundarios negativos para la biodiversidad, el aire, el agua subterránea y la calidad del suelo. Los efectos de diferentes tipos de métodos podrían afectar a las comunidades de manera desigual y crear desafíos en torno a la responsabilidad y la compensación. Los métodos son diversos e incluyen el uso de “sumideros” biológicos y procesos químicos; también varían considerablemente en su potencial, preparación, permanencia, costo y riesgos de efectos secundarios negativos. Salvo por algunas de las medidas basadas en la naturaleza, ninguna está actualmente lista para desplegarse a la velocidad o escala que se necesitará para prevenir un rebasamiento de los objetivos de temperatura del Acuerdo de París. Los posibles métodos técnicos de almacenamiento son los siguientes: el geológico (en formaciones geológicas, como los yacimientos de petróleo y gas, las capas de carbón inexplorables y las formaciones salinas profundas), almacenamiento oceánico (liberación directa en la columna de agua oceánica o en el fondo oceánico), la captura directa del aire, la fijación industrial de CO<sub>2</sub> en carbonatos inorgánicos, etc.). La capacidad de tomar acciones colectivas podría ayudar a abordar estos problemas y fortalecer la rendición de cuentas. Si la sociedad implementara estos procesos a la velocidad y los niveles implícitos en las alternativas evaluadas, los gobiernos tendrían que crear con urgencia incentivos de políticas que puedan estimular importantes inversiones en investigación y permitir el despliegue, al tiempo que garantizan que cualquier investigación, prueba o uso potencial sea seguro y efectivamente gobernado. La colaboración internacional es necesaria para abordar, entre otras cosas, los impactos ambientales, sociales y económicos transfronterizos, así como las cuestiones relacionadas con la responsabi-



lidad, el monitoreo, la contabilidad y las finanzas. Las tecnologías suelen verse como simples mecanismos para remover el dióxido de la atmósfera, desafortunadamente también son responsables de emitir cierta cantidad de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, las plantas que se construirán para la captura directa en el aire serán fabricadas de plásticos, acero y cemento cuya producción emite dióxido y puede consumir energía que no proviene de fuentes de carbono de cero emisiones. Por tanto, se considera que la forma correcta de considerar los impactos climáticos es describirlos en términos de remoción “neta”, o sea la cantidad de CO<sub>2</sub> removida menos cualquier cantidad que corresponda a las emisiones resultantes provocadas como consecuencia de la eliminación. Lo anterior lleva a examinar el proceso de eliminación desde el punto de vista del ciclo de vida, el cual toma en cuenta el desempeño considerando todos los elementos, desde la extracción de las principales materias primas hasta la disposición final de los productos manufacturados, una vez que cumplieron la función para la cual se fabricaron.

## Confinamiento en los océanos

Se ha calculado que el océano contiene 40 000 millones de toneladas de carbono, mientras que la atmósfera 750 000 millones y las tierras 2 200. Esto significa que si todo el CO<sub>2</sub> de la atmósfera se almacenase en las capas más profundas del océano la concentración del gas en los mares aumentaría en 2% como mínimo. El almacenamiento oceánico podría llevarse a cabo de dos formas: mediante la inyección y disolución de CO<sub>2</sub> en la columna de agua (por lo general, a más de 1 000 metros de profundidad) por medio de un gasoducto fijo o un buque en desplazamiento o mediante el depósito de CO<sub>2</sub> por medio de un gasoducto fijo o una plataforma marítima en el fondo oceánico a más de 3 000 m de profundidad, donde el CO<sub>2</sub> tiene mayor densidad que el agua y se espera que forme un “lago” que retrasaría la disolución de CO<sub>2</sub> en el entorno (ver la Figura 26). El almacenamiento oceánico y su impacto ecológico aún están en fase de investigación. No se sabe si el CO<sub>2</sub> almacenado a 3 000 metros de profundidad volvería a la superficie al cabo de 200 años, tampoco cómo va a reaccionar el ecosistema ante esta lenta invasión natural de CO<sub>2</sub>. Esta incertidumbre

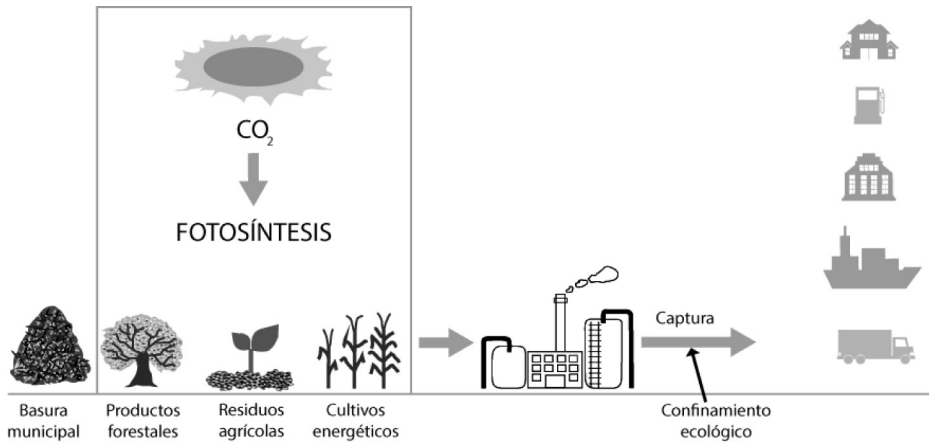
FIGURA 26. Almacenamiento de  $\text{CO}_2$  en el océano

ha inducido a algunos científicos a sugerir que quizá fuese menos perjudicial extraer el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera e inyectarlo directamente en las capas profundas del océano, donde sólo vive una cantidad exigua de organismos marinos. El problema estriba en que a estos organismos de las profundidades oceánicas les afectaría gravemente la rápida modificación de su entorno, habida cuenta de que su lento metabolismo no les permitiría adaptarse con facilidad al cambio producido. Ciertas deficiencias importantes de conocimientos que deberían ser subsanadas antes de evaluar los riesgos y el potencial del almacenamiento oceánico conciernen al impacto ecológico del  $\text{CO}_2$  en los grandes fondos marinos. Deben realizarse estudios sobre la reacción de los sistemas biológicos en el fondo del mar frente a la adición de  $\text{CO}_2$ , en particular estudios de más duración y magnitud que los que se han llevado a cabo hasta la fecha.

### Bioenergía por captura de carbono y confinamiento (BCCC)

La BCCC es una tecnología de emisión negativa neta que emplea primordialmente la poscombustión (ver la Figura 27). Algunos tipos de BCCC pueden

FIGURA 27. Remoción del dióxido de carbono vía la bioingeniería con captura de carbono y confinamiento



ser negativos para la seguridad alimentaria y los ecosistemas naturales. Algunas formas de BCCC pueden reducir las emisiones de carbono, pero no su remoción. Otras tecnologías pueden no proveer beneficio alguno, dado el uso directo de la tierra o el cambio en su forma natural. Poner en marcha formas de BCCC en gran escala requerirán desarrollar cadenas para suplir los insumos derivados de otras fuentes dedicadas a proveer la energía a los cultivos, como pueden ser subproductos de los bosques, residuos agrícolas, desechos municipales. Los desarrollos están limitados por los altos costos y los requerimientos intensivos de fuentes de energía de bajo contenido de carbono, pero dichos costos parecen ser mucho menores que lo estimado con anterioridad y el desarrollo tecnológico continuo puede hacerlo disminuir aún más. Esta tecnología tiene el potencial de capturar entre 0.5 y 5 Gt  $\text{CO}_2$ . La captura y confinamiento del carbono (CCC) inyecta el dióxido en las profundidades del planeta, en donde se confina. En teoría, la quema de una biomasa como la madera se considera como carbono neutral debido a que solamente emite el dióxido de carbono que ya había previamente capturado durante su crecimiento. Si la CCC se emplea para confinar esas emisiones bajo tierra, entonces se puede argumentar que el total del proceso es negativo en carbono. El problema es que algunos cien-

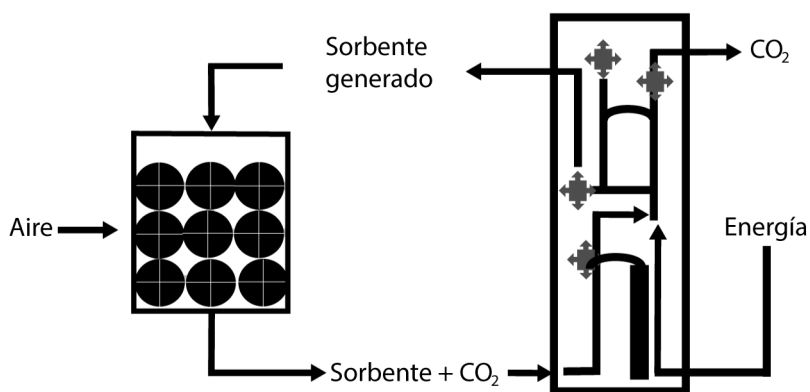
tíficos no están muy seguros de que la biomasa pueda considerarse neutra, pues el dióxido emitido al quemarse los árboles no es recapturado tan rápidamente por nuevos árboles, y el calentamiento global continuará su trayectoria ascendente. El almacenamiento puede tener lugar en formaciones geológicas (yacimientos agotados de gas y petróleo, acuíferos salinos profundos y minas no explotables de carbón). A pesar de la incertidumbre en las predicciones, parece claro que existe suficiente capacidad para almacenar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el hombre durante decenas y posiblemente centenares de años. Los yacimientos de gas y petróleo son considerados como una opción muy segura y factible, ya que, por una parte, han mantenido petróleo, gas y a menudo CO<sub>2</sub> durante millones de años. La inyección de CO<sub>2</sub> en ellos facilita la recuperación del residual de petróleo/gas que queda, dando unos beneficios que costean fácilmente los gastos del almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Como en cualquier otra tecnología existen riesgos asociados a la captura y confinamiento de CO<sub>2</sub>. Lo realmente importante es: (a) si los riesgos son aceptables y (b) si son comparables con otras alternativas para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los riesgos más importantes residen en el transporte y el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Todos los posibles puntos de almacenamiento deben estar lejos de zonas con riesgos sísmicos para asegurar la estabilidad de las formaciones rocosas. El principal riesgo asociado con el almacenamiento reside en el punto de inyección, debido a algún posible escape. La probabilidad de fuga en el almacenamiento subterráneo es realmente baja, y comparable al de un escape de gas natural de alguno de sus yacimientos, lo cual es poco usual. Otra alternativa de la BCCC implica la producción de grandes cantidades de biomasa que luego se procesan para la obtención de biocombustibles líquidos (como el etanol) o mediante su combustión para la producción de electricidad y calor, a la vez que capturan las emisiones resultantes de CO<sub>2</sub> y las almacenan bajo tierra.

### **Captura directa del aire (CDA)**

Capturar CO<sub>2</sub> a partir de la atmósfera es costoso e ineficiente, pero posible. Lo único que hace falta es pasar el aire atmosférico por una planta de

procesado especial que, mediante unos circuitos de recirculación y unos filtros especiales, capturan el dióxido de carbono y lo convierten en otra sustancia. La eliminación del  $\text{CO}_2$  presente en una mezcla gaseosa con otras especies químicas no es un nuevo reto para los ingenieros químicos, pues sistemas similares se han instalado en los submarinos y naves espaciales, ya que es imposible respirar en ambientes cerrados. Los sistemas de captura de gran escala, necesarios para combatir el cambio climático, apenas empiezan a emerger hoy en día. El término *captura directa del aire* (CDA) se refiere a un grupo de tecnologías que emplean químicos para capturar y concentrar el dióxido de carbono del aire. La investigación en materiales sorbentes incluye resinas, polímeros, así como materiales organometálicos. Los sistemas de captura directa pueden visualizarse semejantes a una planta vegetal, ya que de la misma manera en que los árboles emplean la fotosíntesis para extraer el  $\text{CO}_2$  del aire, los sistemas de CDA emplean químicos capaces de unirse exclusivamente con el dióxido y no con ningún otro componente químico del aire. Una vez que el sorbente se satura con el dióxido es necesario añadir energía al sistema (en forma de calor, humedad, presión, etc.) para liberar el  $\text{CO}_2$  puro y regenerar el sorbente para repetir el proceso (ver la Figura 28). La regeneración del sorbente comúnmente se realiza ya sea incrementando la temperatura y/o disminuyendo la presión en el sistema. Cuando la corriente de dióxi-

FIGURA 28. Esquema de captura directa del aire (CDA)



do capturada se confina geológicamente o se utiliza comercialmente para hacer productos no degradables o combustibles, la CDA puede generar una emisión negativa neta. Los sistemas de CDA se pueden escalar fácilmente y la remoción del  $\text{CO}_2$  puede llegar a ser permanente si se confina geológicamente o se transforma en un mineral, con lo que se elimina el paso de transportarlo, como sucede con otras tecnologías de remoción. La CDA produce de una a dos toneladas de agua por tonelada de dióxido removido como subproducto de la operación, lo cual es benéfico en regiones donde hay escasez de agua. La energía requerida en los sistemas de CDA depende de qué tan eficiente es el proceso de captura del dióxido y qué concentración final es requerida. Hoy en día las tecnologías de captura directa son muy caras, pues el alto costo refleja el hecho de que el dióxido es mucho más diluido en la atmósfera que, por ejemplo, en las corrientes de gas natural. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera es aproximadamente de 0.04% comparada con 5% en el caso del gas natural. Como resultado de ello, la energía mínima teórica necesaria para separar el  $\text{CO}_2$  de otros gases es aproximadamente tres veces mayor si se compara con los sistemas que queman carbón. Si se toma en cuenta que una planta generadora de energía de 1 000 mega watts que emplea carbón emite cerca de seis millones de toneladas de dióxido al año, un sistema de CDA, para removerlo como la planta lo genera, necesitaría estructuras de 10 metros de alto dispuestas en una extensión de unos 30 kilómetros. El veredicto acerca del futuro del papel de CDA se ve comprometido por la escasez de resultados experimentales de estos sistemas.

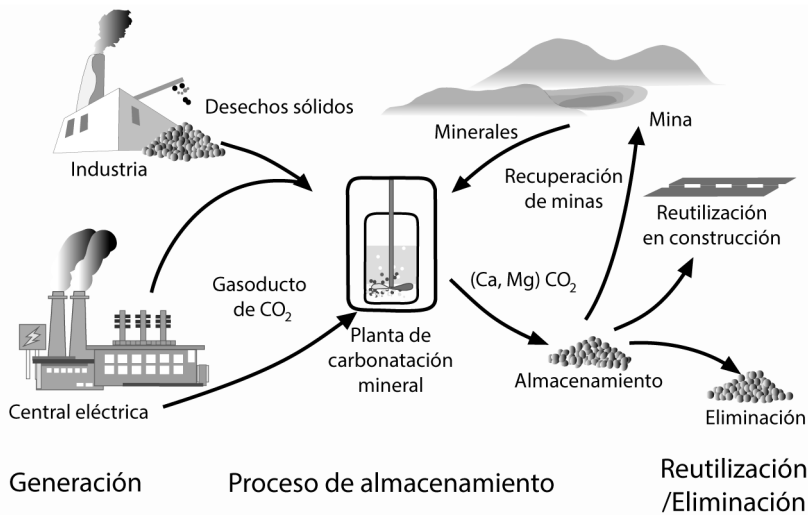
## Carbonatación mineral

La carbonatación mineral consiste en la fijación de  $\text{CO}_2$  mediante el uso de óxidos, como el de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y el de calcio ( $\text{CaO}$ ), presentes en las rocas de silicatos de formación natural. Las reacciones químicas entre estos materiales y el  $\text{CO}_2$  producen compuestos como el carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) y el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ , comúnmente conocido como piedra caliza). La cantidad de óxidos metálicos presentes en las rocas de silicatos que pueden encontrarse en la corteza terrestre excede

las cantidades necesarias para fijar todo el  $\text{CO}_2$  que produciría la combustión de todas las reservas de combustibles fósiles existentes. Estos óxidos también aparecen en pequeñas proporciones en algunos desechos industriales, como la escoria y las cenizas del acero inoxidable (ver la Figura 29).

La carbonatación mineral produce sílice y carbonatos que se mantienen estables durante largos periodos y que, por tanto, pueden eliminarse en zonas como las minas de silicato o pueden reutilizarse con fines de construcción, si bien es probable que esa reutilización sea mínima en relación con las cantidades producidas. Tras la carbonatación el  $\text{CO}_2$  no sería liberado en la atmósfera. Es difícil estimar el potencial de almacenamiento en esta fase inicial de desarrollo. En todo caso, estaría limitado por la fracción de reservas de silicatos cuya explotación sea posible desde el punto de vista técnico, por cuestiones ambientales como el volumen de la eliminación de productos y por obstáculos jurídicos y sociales relacionados con el lugar de almacenamiento. El proceso de carbonatación mineral que se produce de forma natural se conoce como “meteorización”. En la naturaleza el proceso es muy lento, por lo que debe ser acelerado de forma considerable a fin de convertirlo en un método de almacenamiento via-

FIGURA 29. *Proceso de carbonatación mineral*



ble. El impacto ambiental de la carbonatación mineral a gran escala sería consecuencia de la explotación y eliminación necesarias de los productos resultantes que no tuvieran ninguna aplicación práctica. La fijación industrial de una tonelada de  $\text{CO}_2$  requiere entre 1.6 y 3.7 toneladas de rocas de silicatos. Los impactos de la carbonatación mineral son similares a los causados por las minas a cielo abierto a gran escala. Estos comprenden el desmonte, una menor calidad del aire local y los efectos sobre el agua y la vegetación como resultado de la perforación, las excavaciones y la clasificación y lixiviación de metales de los desechos mineros, los cuales también pueden dar lugar indirectamente a la degradación del hábitat. La mayor parte de los productos de la carbonatación mineral deben ser eliminados, lo cual requiere vertederos controlados.

## Algas

Las algas pertenecen al reino Protista, es decir, aquel que agrupa a los organismos que no pueden ser considerados animales, plantas, hongos o bacterias. Y es que, aunque son popularmente conocidas como las “plantas del mar”, no se puede identificar a las algas con los vegetales, ya que no presentan todas sus características y funciones. Poseen una estructura simple llamada talo en lugar de raíz, tallo y hojas o tejido vascular, pues al vivir dentro del agua no necesitan de esos órganos para absorberla. Son organismos formados por células eucariotas (con núcleo) y se dividen en unicelulares —suelen formar parte del fitoplancton— y pluricelulares, aunque no se agrupan formando tejidos, además todas las células realizan todas las funciones. Otra característica fundamental de las algas es que son autótrofas: generan materia orgánica a partir de materia inorgánica utilizando la energía de la luz (fotosíntesis). Su reproducción puede ser asexual, por esporas, o sexual, a través de gametos. Crecen en el fondo del mar o pegadas a las rocas y las hay en mares, ríos y lagos. Su morfología es muy variada (filamentosas, laminariales, calcáreas, etc.), pudiendo ser microscópicas o alcanzar más de 50 m de longitud. Existen más de 30 000 especies conocidas de algas. El cultivo de algas parece la solución perfecta a muchos problemas. Si las algas necesitan del  $\text{CO}_2$  para vivir, ¿por qué no usarlas



para capturar las emisiones de  $\text{CO}_2$ ? Hoy se sabe que hay más de 60 000 variedades diferentes de algas que pueden ser producidas para tales fines. Dado que el crecimiento de las algas es más rápido en términos relativos en comparación a la de muchas especies de árboles, se calcula que sobre una superficie de 10 000  $\text{m}^2$  puede generarse una planta de cultivo con capacidad de producir un millón de litros de líquido verde que, de momento, equivale como mínimo a 40 toneladas de biomasa anuales. Para darse una idea, en esta superficie pueden absorberse unas 200 toneladas anuales de  $\text{CO}_2$  para lo que, en la naturaleza, se necesitaría una treintena de hectáreas (300 000  $\text{m}^2$ ) pobladas con unos 26 000 árboles para fijar la misma cantidad. La gama de subproductos que pueden obtenerse del cultivo de algas es de lo más amplia. Por un lado, las algas prometen en un futuro no muy lejano la elaboración de alimentos de alto valor nutricional. Asimismo, pueden ser utilizadas para la elaboración de alimento para el ganado. La industria farmacéutica, por su parte, puede beneficiarse a partir de la extracción de diversos productos orgánicos sintetizados por las algas o bien de sus exudados, que se emplean como aditivos en medicamentos. Los reactores que contienen microalgas pueden emplearse para capturar simultáneamente el dióxido y limpiar el agua de sus impurezas.

## Usos industriales del $\text{CO}_2$

Los usos industriales del  $\text{CO}_2$  comprenden los procesos químicos y biológicos en los que el  $\text{CO}_2$  actúa como reactivo, por ejemplo, los que se utilizan para la producción de urea y metanol, así como diversas aplicaciones tecnológicas que usan directamente el  $\text{CO}_2$ , como en el sector hortícola, el envasado de alimentos, la soldadura, las bebidas y los extintores de incendios. El  $\text{CO}_2$  está clasificado como un refrigerante natural que ofrece un excelente rendimiento para los sistemas de refrigeración. Pero ¿por qué se considera una buena opción? La historia documenta que, aun cuando el  $\text{CO}_2$  es conocido desde el primer siglo de la humanidad, su uso como refrigerante comenzó hasta el siglo XVIII, cuando dio inicio la refrigeración mecánica. En 1744 Joseph Priestley disolvió por primera vez esta sustancia en agua. El resultado de este experimento fue una disminución de la

temperatura del líquido, por lo que infirió que el fluido poseía propiedades termodinámicas convenientes para ser utilizado en la refrigeración. La mayor parte (dos terceras partes del total) se utiliza para producir urea, que se emplea en la fabricación de fertilizantes y otros productos. Cierta cantidad de  $\text{CO}_2$  es extraída de pozos naturales y otra proporción se origina en las fuentes industriales —como las plantas de producción de amoníaco e hidrógeno— que captan  $\text{CO}_2$  como parte del proceso de producción. En principio, los usos industriales del  $\text{CO}_2$  pueden contribuir a mantenerlo fuera de la atmósfera mediante su almacenamiento en el “depósito químico de carbono” (a saber, las reservas de productos manufacturados carbonatados). No obstante, en tanto que es una medida de mitigación del cambio climático, esta opción únicamente tiene valor si la cantidad y la duración del  $\text{CO}_2$  almacenado son significativas y si se registra una reducción neta real de las emisiones de  $\text{CO}_2$ . La duración típica de la mayor parte del  $\text{CO}_2$  utilizado actualmente para los procesos industriales corresponde a periodos de almacenamiento de tan sólo días a meses. Posteriormente, el carbono almacenado es degradado a  $\text{CO}_2$  para ser emitido de nuevo a la atmósfera. Esas escalas cronológicas tan breves no aportan una contribución válida a la mitigación del cambio climático.

## Conversión del $\text{CO}_2$ por electrólisis

En una celda de electrólisis se disocia  $\text{H}_2\text{O}$  o  $\text{CO}_2$  usando electricidad que proviene de fuentes renovables. Atractiva en su simplicidad, en la electrólisis se realiza la disociación en un solo paso sin necesidad de partes móviles, y los productos se liberan por separado en los compartimientos del ánodo y el cátodo de la celda. En un electrolizador el  $\text{CO}_2$  se reduce en el cátodo, mientras que la reducción del oxígeno tiene lugar en el ánodo. Las pilas de combustible de baja temperatura y las celdas de electrólisis de  $\text{CO}_2$  están a menudo limitadas por el rendimiento, por lo tanto, se está tratando de mejorar mediante el desarrollo de catalizadores más activos. La fijación química del  $\text{CO}_2$  es una técnica atractiva para el uso de fuentes de carbono, así como la reducción de éste en la atmósfera. Sin embargo, el  $\text{CO}_2$  es la estructura más estable dentro de las sustancias base carbono, pero

puede ser reducido por electrólisis para generar productos de uso industrial, todo ello bajo condiciones no muy severas. La transformación oscila entre 30 y 40% del  $\text{CO}_2$  original, razón por la cual tan baja eficiencia puede disuadir sus aplicaciones industriales en el futuro, pero es hoy en día un tópico de investigación en química. La reducción electroquímica del  $\text{CO}_2$  genera  $\text{CO}$ , el cual se puede combinar con el hidrógeno para producir combustibles líquidos, como el metanol. El proceso fue desarrollado por primera vez por los alemanes Franz Fischer (1877-1947) y Hans Tropsch (1899-1935) en 1925.

## Bienes básicos

Se les llama de esta manera a los productos que se destinan para uso comercial y que tienen como característica más relevante no contar con ningún valor agregado, porque se encuentran sin procesar o no poseen ninguna característica diferenciadora con respecto a los demás productos que se encuentran en el mercado. Muchos bienes básicos contienen carbono y en su ciclo de vida generan  $\text{CO}_2$ . La conversión del  $\text{CO}_2$  otra vez en químicos o combustibles hidrocarbonados crea una economía circular que puede aproximarse a la neutralidad de carbono y de manera importante proveen una forma de evadir las emisiones. En general, el consumo de energía primaria para las tecnologías de conversión debe ser renovable para que el ciclo de emisión resulte favorable, preferentemente energía solar y geotérmica. Éste es un requisito importante, ya que generalmente tienen la eficiencia térmica relativamente baja (sólo una pequeña fracción de la energía de entrada se convierte en producto útil).

## Materiales duraderos a base de carbono

En el caso de la producción de cemento el curado es el proceso de controlar y mantener un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura favorable durante la hidratación de los materiales cementantes para el desarrollo de las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla. El

dióxido de carbono puede ser parcialmente reciclado durante las primeras etapas del curado y confinado al formar un producto estable, el carbonato de calcio. El proceso no requiere un aporte significativo de energía y produce potencialmente calor residual que puede ser aprovechado. En la industria de plásticos y hules el carbonato es apreciado por su elevado rango de blancura, elevada pureza, baja abrasividad. La inclusión de este compuesto en esta industria obedece, entre otras características, a su poca absorción de plastificante y óptima capacidad para dispersarse. En la industria del caucho el carbonato de calcio se usa para conservar la maleabilidad y dotar de resistencia al caucho. Otro de los usos del carbonato de calcio se encuentra en la industria de productos de limpieza. En este caso se utiliza para mejorar los jabones y detergentes en distintas fases de su proceso de fabricación sin cambiar sus cualidades. Los materiales duraderos a base de carbono van de la mano con las mejoras tecnológicas, en las que fibras de carbono y los bioplásticos serán la base de la siguiente generación de productos industriales. Los bioplásticos son hechos con recursos renovables como almidón, aceites comestibles, celulosa o, incluso, los residuos agrícolas. Una característica de los bioplásticos es que pueden ser biodegradables o compostables. Esto quiere decir que los biodegradables se pueden hacer o no con recursos renovables. Los plásticos son compostables únicamente cuando son completamente asimilados por los microorganismos como una fuente de energía y convertidos en  $\text{CO}_2$ , agua y biomasa. La tecnología oxo-biodegradable se basa en la introducción de un agente degradante en el proceso de fabricación del plástico convencional. En efecto, los aditivos oxo-degradables bajo la influencia del calor y/o la luz conducen a una descomposición mecánica de los plásticos. La tecnología permite que el plástico tenga una vida útil controlada (entre 6 meses y 5 años), es decir, que con el tiempo se degrade y vuelva a la naturaleza sin contaminar el medio ambiente, caso contrario es el plástico tradicional, que se puede demorar hasta 500 años en degradarse en nuestro planeta. Por otra parte, se han desarrollado compuestos a base de carbono que son una nueva clase de materiales de ingeniería. La fibra de carbono (fibrocarbono) es un material formado por fibras de 5-10 micras de diámetro, compuesta principalmente de átomos de carbono. Las propiedades de las fibras de carbono, tales como una alta flexibilidad,

alta resistencia, bajo peso, tolerancia a altas temperaturas y baja expansión térmica, las hacen muy populares en la industria aeroespacial, ingeniería civil, aplicaciones militares, deportes de motor junto con muchos otros deportes, aunque son relativamente caras en comparación con las fibras de vidrio o de plástico, lo que limita en gran medida su uso. Las fibras de carbono se pueden combinar con una resina para formar material reforzado (a menudo denominado también como fibrocarbono), el cual tiene una muy alta relación resistencia-peso, extremadamente rígido, aunque el material es un tanto frágil. Las fibras de carbono también se combinan con otros materiales, como por ejemplo con el grafito para formar compuestos carbono-carbono, los cuales tienen una tolerancia térmica muy alta.

## **Investigación de futuras tecnologías de mitigación**

La estabilización global de la concentración global de los gases invernadero que impidan un riesgo significativo en el clima requerirá una “descarbonización” masiva de las principales economías del mundo en las siguientes décadas. Para llegar a esa escala de reducción de emisiones se requerirá una política que soporte una amplia gama de tecnologías y cambios de comportamiento. En la Tabla 4 anotamos algunas tecnologías disponibles hoy en día y otras que aparecerán más allá del 2030 enfocadas al sector energético. Debe ser uno cuidadoso considerando que este tipo de estudios son informativos, enfocados a la capacidad de una cierta tecnología, pero no informan sobre el costo-beneficio de las opciones de reducción, las posibilidades de innovación en el tiempo y las políticas que deben seguir los países para alcanzar dichos logros. Para saber cuáles son los últimos avances tecnológicos que podrían ser fundamentales en la defensa del medio ambiente. Sólo habrá una manera de conseguirlo: acceso a nuevas tecnologías y soluciones innovadoras que permitan un crecimiento sostenible de la economía de nuestro planeta. Algunas tecnologías ya están dando resultados, otras, más controvertidas, aún están siendo investigadas y desarrolladas.

Tabla 4. *Tecnologías disponibles y otras que aparecerán más allá del 2030 enfocadas al sector energético*

Sector	<i>Tecnologías de mitigación y prácticas disponibles en el mercado</i>	<i>Tecnologías de mitigación y prácticas disponibles a partir de 2030</i>
Aporte de energía	Distribución más eficiente, cambio de carbón a gas, energía nuclear, solar, geotérmica y bioenergía.	Captura y secuestro de carbono, electricidad generada con biomasa, energía nuclear, energía renovable incluyendo mareomotriz.
Transporte	Vehículos híbridos, diésel más limpio, biocombustibles, cambio de transporte carretero a trenes y transporte público, incremento de transporte no motorizado.	Tercera generación de biocombustibles, mejor eficiencia de aviones, autos híbridos más potentes y con mejores baterías.
Edificios	Aparatos eléctricos, calentadores, aires acondicionados más eficientes. Mejoras en el aislamiento de estufas y diseños solares pasivos y activos mejorados. Uso de fluidos de regeneración alternativos.	Diseños integrados de edificios comerciales incluyendo tecnologías como medidores inteligentes para control de los sistemas a base de celdas solares.
Industria	Uso más eficiente de equipo eléctrico con recuperación de energía, materiales reciclables, control de emisiones de gases diferentes al dióxido de carbono.	Eficiencia energética avanzada secuestro de carbono para la manufactura de cemento, hierro y amoníaco, electrodos inertes para la manufactura de aluminio.
Agricultura	Mejoramiento del manejo de tierras de pastoreo y producción de alimentos, restauración de suelos, mejora en las técnicas de cultivo de arroz, reducción del metano en el ganado, mejores técnicas de aplicación de fertilizantes nitrogenados.	Mejoras en el rendimiento de cosechas.
Manejo de residuos	Mejorar la recuperación de metano en el suelo, incineración de residuos con recuperación de energía, composteo de residuos orgánicos, reciclaje y minimización de los residuos.	Biofiltros para mejorar la oxidación del metano.

## Una estrategia de crecimiento sostenible

El desafío energético para América Latina y el Caribe es triple: proveer a todos los ciudadanos de electricidad, con costes asequibles que impulsen el desarrollo y que sean generadas por fuentes sostenibles con el medio ambiente. Si bien en la región 60% de la electricidad es generada por energías renovables (la más alta a nivel mundial), aún existen 87 millones de personas que cocinan con combustibles altamente contaminantes como la madera y el carbón. En el año 2012 se registraron más de 6.5 millones de muertes relacionadas con la contaminación del aire que respiramos, y casi 95% de esas muertes suceden en países de ingresos medios y bajos. Para poder combatir el cambio climático debemos entonces enfocarnos en soluciones que ayuden a descarbonizar la producción de energía, así como también generar un consumo más eficiente. No debemos esperar sentados que ocurra un milagro energético, de igual forma centrarnos en generar innovaciones que sean capaces de resolver los desafíos más urgentes. El desarrollo económico y el bienestar de América Latina y el Caribe están directamente relacionados con el impacto de este fenómeno y los acuerdos de París dieron cuenta de ello. La inversión en investigación y desarrollo (I&D) más que nunca debe fortalecerse, como también los acuerdos de cooperación que permitan una fluida transferencia de tecnología de países más desarrollados a los que tienen menos ventajas. ¿Será la tecnología capaz de disminuir la concentración de CO<sub>2</sub> de las emisiones? Desde mejoras incrementales en tecnologías ya existentes a propuestas radicalmente rompedoras, revisemos algunas de las propuestas que están sobre la mesa.

## Tecnologías para mejorar la producción de energías limpias

Países, empresas, universidades e investigadores de todo el mundo se encuentran en una carrera contra reloj para idear las tecnologías más innovadoras, viables y eficientes que consigan hacer posible una generación

de energía con cero emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Veamos algunas tecnologías que están enfocadas en resolver estos problemas.

### ***Energía solar y eólica súper inteligente***

La energía solar y la energía eólica se han convertido en fuentes clave de generación de energía limpia y los desafíos a los que se enfrentan ambas son similares. En primer lugar, la intermitencia, debido a que el viento no siempre sopla y el Sol no siempre brilla, no es posible abastecer de electricidad al sistema de manera constante. En segundo lugar, la escalabilidad, debido a que requiere capital intensivo y alto desembolso de dinero para desarrollar la infraestructura acorde. Y, en tercer lugar, el problema del almacenaje. El desarrollo de tecnologías complementarias como las baterías de nueva generación podría ser parte de la solución. Para mitigar el problema de la intermitencia se han desarrollado *softwares* que utilizan inteligencia artificial para procesar los datos que reciben de satélites, estaciones meteorológicas y otros parques eólicos del país. De esta manera, consiguen previsiones de altísima precisión de cómo se comportará el viento y el Sol, logrando así que el uso de esta energía renovable sea más eficiente, a un menor coste y se utilice en mayor proporción. Hasta ahora este problema era resuelto utilizando otras fuentes de energía fósiles que, además de ser caras, contaminan. Estos *softwares* permiten a las empresas prever mejor los picos de utilización y los periodos de intermitencia para hacer un uso más eficiente de la electricidad y con la ayuda de baterías (que como veremos ya están desembarcando en el mercado) cubrir la demanda casi sin interrupciones.

### ***Cometas de energía***

Las turbinas de los molinos pueden ser más grandes o las torres más altas, pero el problema de la intermitencia y el coste no se resuelve. Así piensan los investigadores para crear una novedosa tecnología que pretende captar viento a una altura donde sopla con más fuerza y es constante durante todo el año, es una especie de turbina voladora semejante a una cometa



capaz de captar el viento a una gran altura. La cometa tiene unos rotores o pequeñas hélices semejantes a un helicóptero que no sólo le ayudan a despegar del suelo, debido a la rotación impulsada por las corrientes de aire estos rotores producen la energía eléctrica que se transmitirá a través de un cable que sujeta a la cometa y la mantiene en órbita. Este cable está conectado a una pequeña torre que controlada por un *software* guía los movimientos de la cometa y transmite energía e información. Esta combinación podría ser una gran solución para muchos países que cuentan con el recurso (el viento), pero que carecen de la inversión necesaria para poner en funcionamiento un parque eólico. Además, mejoraría la distribución de la generación de energía, otro problema al que se enfrenta hoy la producción de energía eólica.

### ***Odisea "solar" en el espacio***

El planeta se queda pequeño y no todas las soluciones pueden desarrollarse en él. Se propone que la producción de energía solar en el espacio podría resolver todas las emisiones de gases contaminantes y ser una solución definitiva al cambio climático. Y hace hincapié no sólo en ayudar, sino igualmente en resolver el problema. A través de la localización de paneles fotovoltaicos en satélites ubicados en órbitas terrestres geoestacionarias, se capturaría la energía del Sol y se transmitiría a la Tierra de forma inalámbrica. Así, esta tecnología superaría la intermitencia, que es el principal problema de la energía solar debido a la formación de nubes en la atmósfera o a los periodos nocturnos. Los defensores de esta tecnología argumentan que la energía solar en el espacio es literalmente billones de veces más potente que la que usamos hoy desde la Tierra, y sin duda la más grande fuente de energía disponible. Existen varios problemas que retrasan o impiden su implementación, principalmente asociados a su elevadísimo costo, la dificultad para fabricar paneles fotovoltaicos que puedan soportar la intensidad de la radiación solar espacial o la transmisión inalámbrica de energía a la Tierra de forma eficiente.

### ***Baterías como complemento perfecto***

No es una tecnología para generar energía libre de carbono, pero sí un gran aliado a la hora de luchar contra el cambio climático. Su incorporación a los sistemas de redes eléctricas añade un grado de flexibilidad que permite al operador de la red controlar el almacenamiento y despacho de la energía eléctrica. Entre las grandes ventajas destacan la posibilidad de aumentar la penetración de las fuentes renovables a menudo intermitentes como fotovoltaica y eólica, posponer la inversión en costosa infraestructura necesaria para los picos de demanda que se presentan durante periodos escasos del año, favorecer el consumo de electricidad limpia en los vehículos eléctricos, etcétera.

### **Transitando por una economía circular**

La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía,) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. La economía circular es la intersección de los aspectos ambientales, económicos y sociales. El sistema lineal de nuestra economía (extracción, fabricación, utilización y eliminación) ha alcanzado sus límites. Se empieza a vislumbrar, en efecto, el agotamiento de una serie de recursos naturales y de los combustibles fósiles. Por lo tanto, la economía circular propone un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza los flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia del uso de los recursos.

En pocas palabras, la economía circular se basa en tres principios muy simples: (a) el desperdicio no existe. Los productos deben ser diseñados y optimizados para un continuo ciclo de desensamblado y reutilización al final de su vida útil. (b) La cuidadosa gestión del flujo de materiales. De acuerdo con esta perspectiva, son de dos tipos: por una parte, nutrientes biológicos, diseñados para reincorporarse sin impacto ambiental negativo al ecosistema, contribuyendo de ese modo al crecimiento del capital natu-

ral. Por otra parte, nutrientes tecnológicos, diseñados para reincorporarse sin pérdida de valor al sistema industrial, contribuyendo al crecimiento del capital económico. La energía para alimentar este ciclo debe ser renovable para reducir la dependencia de recursos e incrementar la resiliencia del sistema natural y del sistema económico. (c) El producto debe ser diseñado para ser reconstruido. La economía circular consigue convertir nuestros residuos en materias primas, paradigma de un sistema de futuro. Se trata de implementar una nueva economía, basada en el principio de “cerrar el ciclo de vida” de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía. Es decir, la economía circular aboga por utilizar la mayor parte de materiales biodegradables posibles en la fabricación de bienes de consumo —nutrientes biológicos— para que éstos puedan volver a la naturaleza sin causar daños medioambientales al agotar su vida útil.

### **¿Tendremos pronto un nuevo *software* para el *Homo sapiens*?**

El planeta es un bien común, no pertenece a un individuo en particular ni tampoco a una nación específica. Tampoco pertenece a una sola generación, como la nuestra, también pertenece a todas las criaturas vivientes, tanto a las que viven hoy en día como a las que habitarán en el futuro. Así como toda la humanidad está conectada “horizontalmente” a lo largo del globo, también lo son todas las formas pasadas y futuras unidas “verticalmente” en un continuo de la historia de la vida. Las instituciones políticas y económicas de nuestra civilización tienen como única meta disfrutar el presente, incapaces de evaluar las consecuencias de nuestras acciones sobre el futuro. Lo anterior está fácilmente a la vista en nuestro comportamiento financiero, en donde los individuos, corporaciones y gobiernos están constantemente endeudando el futuro para mejorar el presente. Desafortunadamente, los daños que provocamos en la naturaleza son aprovechados por una minoría en el planeta para vivir bien, aunque esto se haga a costa de dañar al planeta en términos geológicos que se degradan en un espacio de tiempo muy corto. En efecto, nuestros descendientes, cientos o

miles de años en el futuro desearán tener —o tienen el derecho de tener— un clima estable, con niveles de los océanos que han permitido el florecimiento y avances de nuestra civilización. A la luz de la aparente imposibilidad de detener el impacto ecológico y la autodestrucción parece irracional, por tanto, seguir culpando a nuestro “hardware” que incorrectamente lo etiquetamos como crisis del “clima” y “medio ambiente”, y en realidad es una manifestación de una crisis intelectual basada en principios de materialismo mecánico que formaron la base de la revolución industrial. En otras palabras, nuestra crisis es de *software* y no de *hardware*. Esta visión es compartida por muchos individuos, corporaciones y algunos gobiernos, por lo que la respuesta hasta ahora ha sido enfocarse intensamente en el desarrollo de soluciones tecnológicas, es decir, “*hardware*”.

## IV. Epílogo

El cambio climático es el resultado de perturbaciones en el ciclo de carbono que hemos provocado. Los gases de efecto invernadero antropogénicos en la atmósfera colocan el carbono en el lugar donde no debía estar presente, con una concentración y tiempo de vida errados. Somos nosotros quienes hemos convertido al carbono en una toxina como el plomo en el agua potable. Las estrategias actuales para impedir el deterioro tienen como propósito promover el objetivo de cero emisiones. La gobernabilidad se ha relacionado tradicionalmente con lo que hacen los gobiernos. La gobernabilidad, mucho más compleja, se refiere a las estructuras, procesos, reglas y tradiciones que dan vida a las acciones individuales y colectivas por las cuales la sociedad comparte el poder y toma las decisiones. La gobernabilidad de los ecosistemas es intrínsecamente una materia difícil porque tanto las sociedades humanas y el medio ambiente natural se caracterizan por dinámicas complejas, incluyendo las variaciones naturales y las incertidumbres asociadas. Se ha dicho que una gobernabilidad exitosa es fácil de alcanzar cuando (a) se puede dar seguimiento al uso de los recursos por parte de los miembros de la comunidad a bajo costo; (b) los cambios en los recursos, el uso de tecnologías de población y otros factores económicos y sociales deben llevarse a cabo a velocidades moderadas; (c) los miembros de la comunidad mantienen una comunicación directa e incrementan su confianza entre ellos, y (d) los usuarios son capaces de monitorear y reforzar los diseños que ellos mismos han decidido hacer. A pesar de lo anteriormente dicho, hay quien insiste en que

debemos confrontar dos retos distintos. El primero es si podemos limitar las peores posibilidades de un cambio climático y evitar la extinción de los humanos, limitando la emisión de gases invernadero y por tanto disminuyendo la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. El segundo reto es saber si seremos capaces de transitar a una nueva forma de vida en el mundo que hemos producido. Para alcanzar el segundo reto es necesario que nos lamentemos de lo que ya hemos perdido aprendiendo de la historia, encontrando formas realistas de seguir adelante y aferrándonos a la idea de que un nuevo florecimiento de la humanidad se puede dar, a pesar de desconocer la forma en que dicho florecimiento se dará. El hecho de que nuestra situación no ofrece buenas perspectivas no nos absuelve de la obligación de buscar formas de seguir adelante, el apocalipsis está sucediendo día a día y nuestro gran reto es aprender a vivir con esa verdad. El gran despliegue de soluciones tecnológicas requerirá una aproximación multidisciplinaria que incluye la ciencia de los materiales, la ingeniería de procesos, de reactores, geomecánica, geoquímica y análisis de ciclo de vida. Estas disciplinas generarán otras como por ejemplo la ingeniería química regenerativa. Si bien hoy en día las emisiones de carbono son consideradas como contaminantes, las tecnologías innovadoras emergentes y el manejo apropiado del suelo permiten visualizar que el carbono atmosférico tiene el potencial de ser transformado en un recurso valioso. Combinado con el incremento de energías limpias y la comprensión del papel que juega el carbono en el suelo, la capacidad de los humanos para innovar permite una visión inimaginable. Una economía próspera que captura y confina más carbono del que emite. Ante todo, necesitamos un mayor liderazgo y una firme voluntad política, ya que si continuamos como hasta ahora los efectos serán catastróficos y provocarán un aumento de la temperatura global de 3 °C, o incluso superior, durante este siglo. Por ese motivo, impulsar la acción contra el cambio climático requerirá de un liderazgo atrevido por parte de los líderes gubernamentales, empresariales y de la sociedad civil. Pero los ciudadanos también pueden marcar la diferencia: cambiar el comportamiento de los consumidores es otra faceta importante en el avance hacia una economía con bajas emisiones de carbono. Por ese motivo, las Naciones Unidas han impulsado la Campaña “Actúa Ahora” donde se ofrecen ideas básicas so-

---

bre los pasos que todos podemos dar para alcanzarla. Pero la parte más negativa es que no disponemos de demasiado tiempo y hay que actuar lo antes posible. Cada pizca de calentamiento global es importante, y cuanto más tiempo esperemos, mayor será su impacto negativo.





## Bibliografía

- Abate, R. y Greenlee, A. B. (2010). Sowing seeds uncertain - ocean iron fertilization, climate change, and internacional law. *Pace Environmental Law Review*, 27(2), 555-598. <http://digitalcommons.pace.edu/pelr/vol27/iss2/5>
- Carbono 180 (2018). *Construyendo una nueva economía de carbono: Un plan de innovación*. Nuevo Consorcio de Economía de Carbono. <https://carbon180.org>
- Cummins, C. L., Lin, S. H. y Trump, B. D. (2017). Public perceptions of climate geoengineering: A systematic review of the literature. *Climate Research*, 73(3), 247-264.
- Dow, K., Berkhout, F., Preston, B. L., Klein, R. J. T., Midgley, G. y Shaw, M. R. (2013). Limits to Adaptation. *Nature Climate Change*, (3), 305-307. <http://doi.org/10.1038/nclimate1847>
- Fuss, S., Canadell, J. G., Peters, G. P., Tavoni, M., Andrew, R. M., Ciais, P., Jackson, R. B., Jones, C. D., Kraxner, F., Nakicenovic, N., Le Quéré, C., Raupach, M. R., Sharifi, A., Smith, P. & Yamagata, Y. (2014). Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4(10), 850-853.
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Oliveira García, W. de, Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente J. L., Wilcox, J., Mar Zamora Domínguez, M. del, & Minx, J. C. (2018). Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6).

- Gasser, T., Guivarch, C., Tachiiri, K., Jones, C. D. & Ciais, P. (2015). Emisiones negativas físicamente necesarias para mantener el calentamiento global por debajo de 2 °C. *Nature Communications*, 6(7958). <https://doi.org/10.1038/ncomms8958>
- Gobierno de la Ciudad de México. (s. f.). *Impactos y costos económicos del cambio climático*. Ciudad de México: Sedema. [http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca\\_cc/Costos\\_cambio\\_climatico\\_vf.pdf](http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/Costos_cambio_climatico_vf.pdf)
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC). Cambridge University.
- IPCC (2018). *Global Warming of 1.5 °C. Special Report*. <http://report.ipcc.ch/sr15>
- IPCC (2019). *Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf)
- ISO 14090:2019(es) (s. f.). *Adaptación al cambio climático: Principios, requisitos y directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14090:ed-1:vl:es>
- Juma, C. (2017). *Innovation and its Enemies. Why People Resist News Technologies*. Universidad de Oxford.
- Lucht, J. M. (2015). Public Acceptance of Plant Biotechnology and GM Crops. *Viruses*, 7(8), 4254-4281. <https://doi.org/10.3390/v7082819>
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H. de, Loos, M., y Meyer, L. (Eds.) (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono: Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Nogal, A. del (6 de marzo de 2020). *La resiliencia ambiental es vital para sobrevivir*. La contaminación. <https://lacontaminacion.org/la-resiliencia-ambiental-es-vital-para-sobrevivir/>

- Organización Panamericana de la Salud. (2017). *Salud en las Américas*. <https://www.paho.org/salud-en-las-americas-2017>
- Reicher, D., Brown, J., Fedor, D., Carl, J., Seiger, A., Ball, J. & Shrimali, G. (2017). *Derisking Decarbonization Making Green Energy Investments Blue Chip*. Universidad de Stanford. <https://law.stanford.edu/publications/derisking-decarbonization-making-green-energy-investments-blue-chip/>
- Sandalow, D., Friedmann, S. J., McCoy, S. T. & McCormick, C. (2018). *Captura directa de dióxido de carbono en el aire: Innovación para una serie de hojas de ruta del foro Cool Earth*. <https://www.icef-forum.org>
- Schuiling, R. D., & Krijgsman, P. (2006). Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester CO<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 74(1-3), 349-354. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-005-3485-y>
- Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., *et al.* (2016). Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Climate Change*, 6(1), 42-50.
- Vaughan, N. E., Gough, C., Mander, S., Littleton, E. W., Welfle, A., Gernat, D. E. H. J. & Van Vuuren, D. P. (2018). Evaluating the use of biomass energy with carbon capture and storage in low emission scenarios. *Environmental Research Letters*, 13(4).

## Sobre los autores



Isaac Schifter es químico farmacéutico biólogo por la Facultad de Química de la UNAM y doctor en química por la Universidad Claude Bernard de Lyon, Francia. Desde 1970 su actividad profesional la ha realizado fundamentalmente en el Instituto Mexicano del Petróleo desde puestos gerenciales en los campos de la investigación y desarrollo tecnológico. Es investigador emérito del Sistema Nacional de Investigadores.



Carmen González-Macías es bióloga por la Universidad Autónoma Metropolitana, maestra en ciencias por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctora en Conservación de Recursos Naturales por el CIBNOR. Desde 1982, ha realizado su actividad profesional en el Instituto Mexicano del Petróleo como jefa de proyecto y líder de especialidad en estudios de contaminación por petróleo en ecosistemas marinos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

## Índice de Figuras y Tablas

Figura 1. Visión del Antropoceno .....	26
Figura 2. Zona de Convergencia Intertropical .....	28
Figura 3. Crecimiento poblacional proyectado .....	30
Figura 4. Fórmula de la glucosa .....	31
Figura 5. Ciclo del carbono .....	32
Figura 6. La combustión exotérmica .....	36
Figura 7. Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de gas .....	42
Figura 8. Emisiones de dióxido de carbono por sector .....	44
Figura 9. Eficiencia de los motores de combustión interna .....	45
Figura 10. Central térmica de generación de energía .....	47
Figura 11. Emisiones provocadas por la agricultura .....	49
Figura 12. Contaminación producida por las actividades humanas .....	50
Figura 13. Áreas de desertificación en el planeta. El desierto de Atacama .....	55
Figura 14. Emisiones de metano por fuente .....	59
Figura 15. Los nueve puntos críticos .....	69
Figura 16. El proceso de colapso y nuevo estado del sistema ....	73
Figura 17. Terrenos en vías de reforestación .....	80
Figura 18. Producción de biocarbón .....	84
Figura 19. Impacto del biocarbón sobre el ciclo del carbono (reducción de las emisiones de CO <sub>2</sub> hacia la atmósfera) ....	85

Figura 20. Programa de restauración de tierras deforestadas . . . .	91
Figura 21. La mejora de las pesquerías tiene como propósito aumentar el tamaño y el número de los peces . . . . .	91
Figura 22. Conversión directa del dióxido de carbono por biocatálisis . . . . .	101
Figura 23. Obtención de alcohol a partir de lignocelulosa y otros desechos . . . . .	102
Figura 24. Geoingeniería para contrarrestar el efecto invernadero	104
Figura 25. Importancia de las emisiones negativas para mitigar los incrementos de temperatura . . . . .	111
Figura 26. Almacenamiento de CO <sub>2</sub> en el océano . . . . .	114
Figura 27. Remoción del dióxido de carbono vía la bioingeniería con captura de carbono y confinamiento . . . . .	115
Figura 28. Esquema de captura directa del aire (CDA) . . . . .	117
Figura 29. Proceso de carbonatación mineral . . . . .	119
Tabla 1. Efectos producidos por el aumento en la temperatura terrestre de 1.5 °C vs. 2 °C . . . . .	64
Tabla 2. Pérdidas en la producción agrícola . . . . .	88
Tabla 3. Porcentaje de albedo de distintas superficies . . . . .	107
Tabla 4. Tecnologías disponibles y otras que aparecerán más allá del 2030 enfocadas al sector energético . . . . .	126

## Índice general

Contenido .....	7
<i>Resumen</i> .....	9
<i>Prefacio</i> .....	11
I. <i>El colapso de la civilización</i> .....	17
Fourier y el calentamiento global .....	22
La era del Antropoceno .....	23
La aparición de las primeras ciudades .....	27
Los ciclos del carbono .....	31
El ciclo lento de carbono .....	33
El ciclo rápido de carbono .....	34
Distribución del CO <sub>2</sub> en la atmósfera .....	35
La combustión completa vs. la incompleta .....	36
¿Qué evidencias existen del calentamiento? .....	37
Sensibilidad y cambio climático .....	40
Efecto invernadero y su relación con el CO <sub>2</sub> .....	42
Contribución del transporte .....	43
Contribución por la producción de electricidad .....	45
Contribución de la industria .....	46
Contribución del sector comercial y residencial .....	47
Contribución del sector agrícola .....	48
La contribución de los humanos .....	48
Los impactos en los océanos .....	49

¿Cómo adaptarse a los impactos de los océanos? .....	52
Impacto por cambios en el uso del suelo .....	54
Impacto por la degradación del suelo .....	54
Impacto por la pérdida de biodiversidad .....	56
Metano, otro importante gas de efecto invernadero .....	57
Principales fuentes emisoras de gas metano .....	58
El óxido nitroso, otro villano del efecto del calentamiento global .....	60
¿Quién es el óxido nitroso? .....	61
¿En dónde se produce el óxido nitroso? .....	61
¿Qué pasa si la temperatura aumenta 0.5 °C de más? .....	62
Características del colapso de los ecosistemas .....	63
¿Por qué suceden los colapsos? .....	65
La metáfora de los puntos cruciales .....	67
¿Cuáles puntos críticos se han rebasado? .....	68
Crecimiento económico vs. cambio ambiental .....	70
Sostenibilidad y resiliencia .....	71
¿Se puede evitar el colapso? .....	72
 II. <i>Adaptación</i> .....	 75
¿Qué es la adaptación al cambio climático? .....	77
Remover el dióxido de carbono .....	78
Forestación y reforestación .....	79
Secuestro del carbono en el suelo .....	81
Fertilización de los océanos .....	82
Biocarbón .....	83
Mineralización del carbono .....	86
Urge cambiar la manera en que se producen y consumen los alimentos .....	87
Efectos del cambio climático sobre la salud humana .....	92
Adaptación de las ciudades .....	96
El cuidado del agua .....	97
 III. <i>Mitigación</i> .....	 99
Estrategias para el precio del carbono .....	100



Ingeniería fotosintética .....	100
Geoingeniería .....	103
Aerosoles .....	104
Métodos para alejar la luz del planeta .....	105
Modificaciones del albedo superficial .....	105
Tecnologías de emisiones negativas .....	108
Confinamiento en los océanos .....	113
Bioenergía por captura de carbono y confinamiento (BCCC)	114
Captura directa del aire (CDA) .....	116
Carbonatación mineral .....	118
Algas .....	120
Usos industriales del CO <sub>2</sub> .....	121
Conversión del CO <sub>2</sub> por electrólisis .....	122
Bienes básicos .....	123
Materiales duraderos a base de carbono .....	123
Investigación de futuras tecnologías de mitigación .....	125
Una estrategia de crecimiento sostenible .....	127
Tecnologías para mejorar la producción de energías limpias	127
Transitando por una economía circular .....	130
¿Tendremos pronto un nuevo <i>software</i> para el <i>Homo sapiens</i> ?	131
IV. <i>Epílogo</i> .....	133
<i>Sobre los autores</i> .....	140
<i>Bibliografía</i> .....	137
<i>Índice de Figuras y Tablas</i> .....	141

*El Reloj del Apocalipsis. ¿La antesala de un colapso ecológico?*, de Isaac Schifter y Carmen González-Macías, publicado por Ediciones Comunicación Científica S. A. de C. V., se terminó de imprimir en diciembre de 2021, en los talleres de Litográfica Ingramex S.A. de C.V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 300 ejemplares impresos en papel cultural de 75 gr.