

# La ecología global

Nuestro planeta es un perfecto ejemplo de coevolución entre seres vivos y medio abiótico. La Tierra sería radicalmente distinta —y la vida como la conocemos no existiría— sin la acción fotosintética de las plantas que, durante millones de años, posibilita mantener la composición de la atmósfera terrestre en un permanente desequilibrio químico: de una rica en dióxido de carbono a otra rica en oxígeno.

Hoy, por la magnitud de la influencia e impactos de la actividad humana sobre el planeta, esta coevolución asume otras dimensiones. Incluso, Vitousek y otros ecólogos hablan de una dominación humana del globo terráqueo. En esta perspectiva, la conservación de la naturaleza no puede pensarse como el mantenimiento de grandes extensiones del planeta en un estado prístino. Al contrario, ahora toda la naturaleza está de algún modo manejada, sea por estar sujeta al aprovechamiento directo del ser humano para obtener diversos recursos económicos o servicios ecológicos, o bien por los impactos indirectos de la actividad antrópica. De allí la necesidad de garantizar un manejo sustentable.

En términos globales, los seres humanos hemos transformado o degradado entre treinta y nueve y cincuenta por ciento de la superficie del planeta, la velocidad de extinción de especies aumentó entre cien y mil veces respecto a los valores previos a nuestra presencia en la Tierra, utilizamos sesenta por ciento del escurrimiento superficial de agua dulce accesible y hemos aumentado la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en treinta

por ciento respecto a los niveles preindustriales (cuadro 1). Se estima que varios de los principales problemas ambientales globales, como aquéllos que tienen efecto en el clima, se producen a una velocidad y magnitud tal, que puede llevarnos a desestabilizar completamente la biósfera en pocas décadas, con impactos muy serios para los seres humanos.

Como correlato —a veces consecuencia, muchas otras causa—, existe un entramado social cada vez más complicado, donde las desigualdades tanto al interior de los países como entre éstos se hacen más notorias. Un ciudadano medio de los Estados Unidos consume en promedio entre cuarenta y doscientas veces más recursos que su equivalente en la India; los miembros de los estratos acomodados de México consumen varias decenas de veces más que los estratos más pobres; África, en su conjunto, ahora tiene niveles de pobreza e indicadores de desarrollo económico y social más bajos que hace treinta años.

Los impactos ambientales han conectado y globalizado a los habitantes del planeta en forma inédita. Hoy, los campesinos pobres de los deltas de Bangladesh están en peligro de ver sus tierras arrasadas por el mar debido al impacto en el clima de los miles de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> que son enviadas a la atmósfera cada año por el insaciable apetito de los automóviles —arquetipos del sueño americano— en los Estados Unidos.

Esta novedosa situación trae consigo dilemas de tipo político, económico, social y, por supuesto, tecnológico y ambiental. La ecología global se enfrenta a ellos desde

*desde la perspectiva del cambio climático*



**Omar Raúl Masera**

## CUADRO 1. PROBLEMAS CON IMPLICACIONES AMBIENTALES GLOBALES Y SUS IMPACTOS ASOCIADOS

### TRANSFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE TERRESTRE.

El ser humano ha transformado entre 39% y 50% de la superficie terrestre. La deforestación mundial alcanza 15 millones de hectáreas al año.

IMPACTOS ASOCIADOS: Pérdida de biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero, degradación y erosión de suelos, cambios en el microclima y el ciclo hidrológico.

### PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD.

Se pierden especies de 100 a 1 000 veces más rápido que con las tasas naturales. Se estima que 11% de las aves, 18% de los mamíferos, 5% de los peces y 8% de las plantas están en peligro de extinción.

IMPACTOS ASOCIADOS: Reducción de la variabilidad genética, pérdida de resiliencia y cambios en los ecosistemas que a su vez pueden acelerar los procesos de degradación y extinción.

### AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI).

Las concentraciones de gei están entre 30% y 115% por arriba del nivel preindustrial. A las tasas actuales se espera un doblamiento de las concentraciones equivalentes de CO<sub>2</sub> (es decir tomando el efecto conjunto de los distintos GEI) en menos de 30 años. La velocidad de cambio en las concentraciones de estos gases es inédita en la historia reciente del planeta.

IMPACTOS ASOCIADOS: Aumento de temperatura de 1.5 a 6.7°C en 100 años, aumento de 0.1 a 0.9 metros en el nivel del mar, cambios en los patrones de precipitación y evapotranspiración, pérdida de biodiversidad y cambios en los ecosistemas, aumento de plagas y enfermedades, graves disrupciones en las economías.

### MODIFICACIÓN DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS DE NUTRIMENTOS (NITRÓGENO).

La fijación de nitrógeno por causas humanas (uso de fertilizante en agricultura, quema de combustibles fósiles, cultivo de leguminosas) es de igual magnitud que la fijación natural.

IMPACTOS ASOCIADOS: Aumento de gases de efecto invernadero (óxido nitroso), lluvia ácida y smog fotoquímico, contaminación de mantos acuíferos y eutricación.

### MODIFICACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DE AGUA DULCE.

Se utiliza más del 50% de la escorrentía superficial accesible a nivel mundial. Del agua disponible 70% se utiliza para agricultura, se han modificado más de 90% de las cuencas hidrográficas.

IMPACTOS ASOCIADOS: Salinización, erosión de suelos, cambios en el clima a nivel regional, alteración grave de los ecosistemas, aumento en la escasez de agua y en los conflictos regionales e internacionales por su acceso.

### PÉRDIDA DE LA CAPA DE OZONO.

Las pérdidas de ozono alcanzan entre 3% y 7% en las latitudes intermedias y hasta 50% en la Antártida. El aumento de la radiación ultravioleta en esta región alcanza 120%.

IMPACTOS ASOCIADOS: Incidencia de cánceres de piel, alteraciones al sistema inmunológico y a los ojos, cambios en las relaciones de competencia entre plantas superiores. (El protocolo de Montreal ha logrado disminuir significativamente las emisiones de CFC pero quedan todavía retos importantes para eliminar el problema).

### ARMAS NUCLEARES Y DISPOSICIÓN DE DESECHOS RADIACTIVOS.

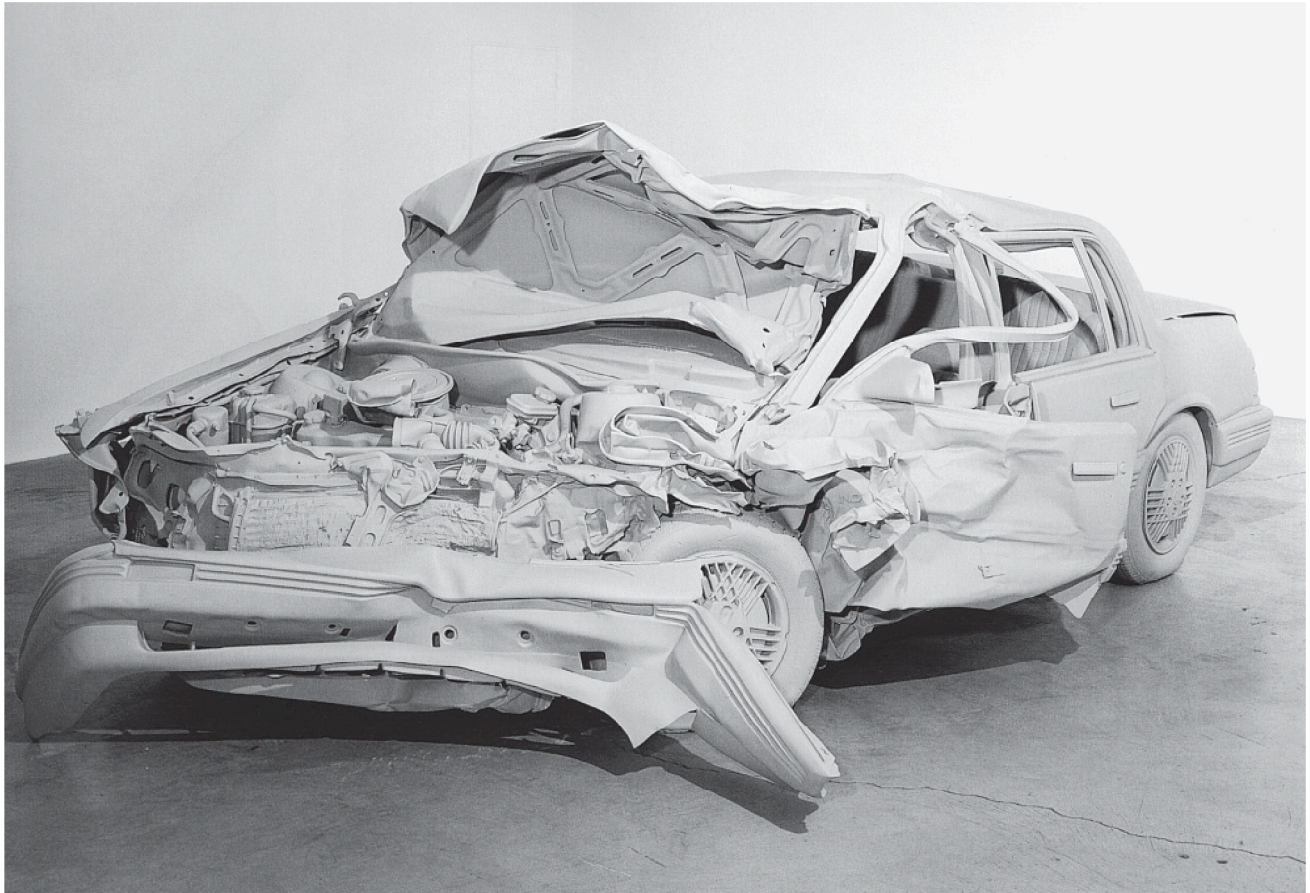
Existen 30 000 ojivas nucleares. Estados Unidos y Rusia tienen 2 000 listas para usarse. Existen 433 reactores nucleares en operación. Los tratados de control de armas contemplan sólo una pequeña fracción del total de ojivas. Estados Unidos se ha retirado de los tratados de control de armas nucleares.

IMPACTOS ASOCIADOS: Contaminación de aire, agua y suelos. Generación de residuos radiactivos peligrosos por cientos y hasta miles de años. Una conflagración de mediana envergadura podría provocar el llamado "invierno nuclear", con consecuencias catastróficas para el planeta.

### AUMENTO DE LA POLARIZACIÓN SOCIAL.

El número de pobres aumenta a nivel global. Aumentan también las diferencias entre ricos y pobres al interior de las naciones.

IMPACTOS ASOCIADOS: Mayores tensiones sociales y conflictos por acceso a los recursos. Aumento del uso ineficiente de recursos tanto por consumo suntuario como por necesidades de supervivencia.



distintas perspectivas de estudio, que incluyen las investigaciones disciplinarias más convencionales —como los detallados estudios de los ciclos biogeoquímicos globales de nutrientes—, e investigaciones interdisciplinarias que tratan de entender la problemática de las interacciones entre la sociedad y la naturaleza en todo el planeta.

#### **El cambio climático global**

El cambio climático global es considerado por las Naciones Unidas, el problema ambiental más grave que enfrentará el planeta en el siglo XXI. Este fenómeno se define como el posible incremento en la temperatura superficial de la Tierra por el rápido aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Las variaciones en la temperatura del planeta tendrían repercusiones directas en otros parámetros que caracterizan al clima, como precipitación, evapotranspiración, humedad edáfica, entre otros.

La radiación solar entra en nuestra atmósfera mayoritariamente en forma de radiación visible, treinta por ciento es reflejada al espacio exterior y el restante setenta es absorbido y reemitido por la superficie terrestre en forma de radiación infrarroja. Buena parte de la última, en lugar de retornar al espacio, es absorbida y reemitida por una serie de gases traza de la atmósfera conocidos como gases de efecto invernadero (GEI). Este proceso retiene momentáneamente el calor en la atmósfera con lo que calienta la superficie terrestre. Cuanto mayor es la concentración de GEI, mayor es el calor y, por tanto, el calentamiento del planeta. De hecho, el efecto invernadero permite que la temperatura de equilibrio de la Tierra sea 13 °C, en lugar de -20 °C si no existiera.

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nítrico y los halofluorocarbonos (HFC). Contribuye también el ozono troposférico y otros gases en menor proporción. Exceptuando el vapor de agua, los demás han

aumentado rápidamente sus concentraciones producto de la actividad humana. Entre ellos, el CO<sub>2</sub> es responsable de aproximadamente sesenta por ciento del calentamiento total, sus principales fuentes incluyen la quema de combustibles fósiles y los procesos de deforestación (cuadro 2). El metano es emitido a la atmósfera básicamente por procesos de descomposición anaeróbica en los cultivos de inundación, por la fermentación entérica del ganado y por las fugas de gas natural durante su extracción y distribución. El óxido nitroso es liberado por la aplicación de fertilizantes químicos en la agricultura y durante los procesos de deforestación. Finalmente, los HFC se usan como propelentes en los aerosoles, como refrigerantes y como aislantes.

Desde finales de los años ochentas se lanzó un esfuerzo científico internacional sin precedentes en la temática de cambio climático, el cual ha permitido generar una sólida evidencia sobre algunos de sus aspectos. En particular se ha determinado que la actual temperatura promedio de la superficie terrestre es la mayor en por lo menos los últimos mil años, y ha aumentado 0.6 °C en el último siglo; el incremento de la temperatura del planeta está asociado al de la concentración de gases de efecto invernadero, cuyos niveles actuales son inéditos en por lo menos algunos miles o hasta millones de años. Por

ejemplo, el CO<sub>2</sub> está treinta y un por ciento por arriba del nivel preindustrial y el metano, ciento quince por ciento. Otros gases como los HFC ni siquiera existían entonces; el aumento de la temperatura en los últimos cincuenta años es de origen antropogénico.

Si continúan las actuales tendencias, en los próximos cien años la concentración de CO<sub>2</sub> aumentaría entre 75 % y 350 % respecto al nivel preindustrial; la temperatura superficial del planeta se incrementaría entre 1.4 y 5.8 °C, una tasa de aumento sin precedente en por lo menos los últimos 10 000 años; crecería el nivel del mar entre 0.1 y 0.9 metros; la precipitación tendría fuertes variaciones regionales y tenderá a aumentar globalmente; los glaciares continuarían disminuyendo de tamaño. La distribución del calentamiento no sería homogénea, los polos se calentarían mucho más que las regiones tropicales y los cambios serían más extremos en las áreas continentales que en el mar.

Los intervalos en que pueden ocurrir estos eventos, varían debido a la incertidumbre sobre las trayectorias futuras de las emisiones y sobre la sensibilidad climática —es decir, la respuesta de la temperatura ante cambios de concentración de los gases de efecto invernadero. Las consecuencias de esos cambios, particularmente en el límite superior de las predicciones, serían devastadoras.

CUADRO 2. CICLO BIOGEOQUÍMICO GLOBAL DEL CARBONO (C)

La interacción de la atmósfera con la biósfera en el ciclo global del carbono se da mediante tres grandes procesos:

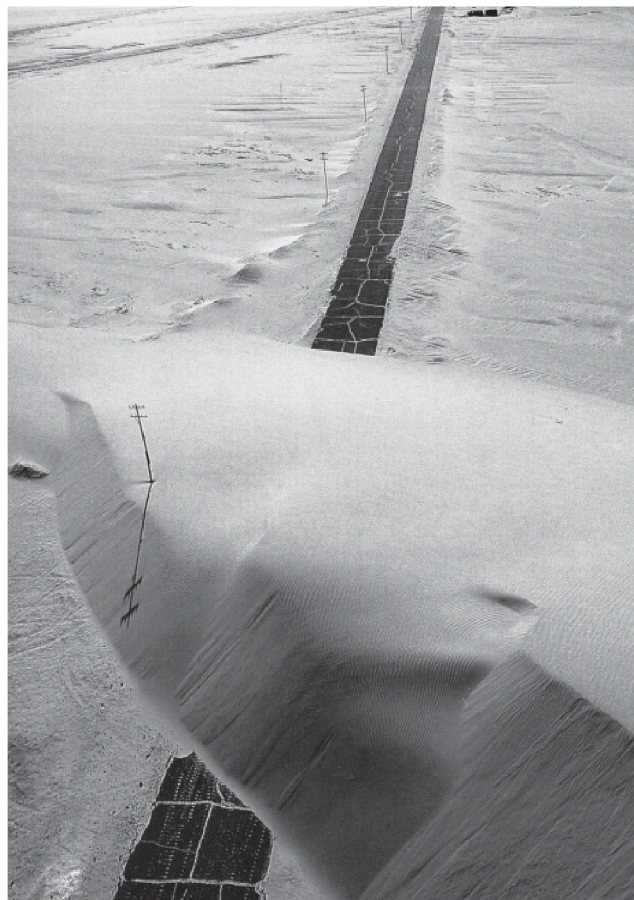
- a) El biológico, representado por los procesos de fotosíntesis —mediante el cual el CO<sub>2</sub> es retirado de la atmósfera para convertirse en materia vegetal— y de respiración/descomposición de las plantas —mediante el cual el CO<sub>2</sub> contenido en la materia viva vuelve a la atmósfera. En circunstancias normales este proceso está aproximadamente en equilibrio, con un flujo anual de 55 mil millones de toneladas de C —o 55 gigatoneladas (GtonC)— en cada dirección. Sin embargo, actualmente la deforestación y degradación forestal causa un flujo neto adicional de uno a dos GtonC de la biósfera hacia la atmósfera. Por otro lado, existe un sumidero transitorio por la recuperación de áreas abandonadas y el efecto de la fertilización, el propio aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico y la deposición de nitrógeno, que implica un flujo anual de dos GtonC de la atmósfera hacia los ecosistemas terrestres. Este ciclo opera en menos de un año para los procesos de respiración-fotosíntesis hasta decenas de años para los procesos de descomposición de la materia orgánica.
- b) El químico, que básicamente consiste en el intercambio de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y el océano por diferencias en las concentraciones de equilibrio del gas en estos dos compartimientos. En este caso, el intercambio neto es de aproximadamente dos GtonC por año hacia el océano, quien actúa como un gran sumidero de CO<sub>2</sub>. Este proceso tiene un tiempo característico de uno a diez años para las aguas superficiales del océano, pero implica cientos de años si consideramos el proceso de equilibrio entre las aguas superficiales y las profundas.
- c) El resultante de la quema de combustibles fósiles cuyo principal producto es CO<sub>2</sub> que proviene de materia viva fósil almacenada en los yacimientos de petróleo y carbón. Significa un flujo neto de la biosfera hacia la atmósfera de 6.4 GtonC al año. Este flujo es enteramente antropogénico y tiene un crecimiento anual del 1.5%.

El balance neto de los tres procesos es, para la década de los años noventas, un flujo neto de 3.8 GtonC al año hacia la atmósfera, que está implicando el aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> y el consecuente peligro del cambio climático.

En efecto, aumentaría la incidencia de plagas y enfermedades como la malaria, cuya distribución depende de la temperatura; la pérdida de diversidad y cambios en la productividad de los ecosistemas, la reducción en las cosechas de cereales y el incremento en la escasez de agua. Serían particularmente severos para las poblaciones que viven en las zonas costeras, pues estarían sujetos a inundaciones y tormentas. En general, se predice que a mayor temperatura mayores serán los eventos extremos como ondas de calor o tormentas tropicales. Si alcanzamos una concentración de CO<sub>2</sub> tres veces mayor que la actual podrían ocurrir cambios cualitativos con consecuencias catastróficas para el clima, como la supresión del cinturón transoceánico que controla el transporte de calor en los océanos.

En este panorama, existirían grandes diferencias regionales. Por ejemplo, algunas zonas áridas o muy frías podrían beneficiarse con un clima más húmedo o benigno. Sin embargo, en la escala global, se espera un saldo negativo de estos cambios. Las recientes olas de calor en Europa, los Estados Unidos y Canadá, las cuales causaron grandes apagones de electricidad y numerosos muertos, y las devastadas consecuencias de los huracanes Katrina, Stan y Wilma, proporcionan una idea del tipo de problemas que enfrentaríamos con el cambio climático. Debe señalarse que en todos los escenarios, los grupos y países más afectados son los más pobres. De hecho, hay un desproporcionado efecto sobre los países pobres y los grupos de menores recursos.

El clima es un ejemplo clásico de un sistema complejo. Las predicciones son difíciles, existe una incertidumbre inherente en los resultados de largo plazo, por lo que las estimaciones siempre se presentan asociadas a un intervalo de confianza. Las principales fuentes de incertidumbre son los ciclos globales de los gases —por ejemplo, todavía hay importantes lagunas de información respecto a las emisiones de metano o las emisiones-absorción de CO<sub>2</sub> de los ecosistemas naturales—, los efectos de retroalimentación, por ejemplo, se sabe que a mayor temperatura habrá más vapor de agua en la atmósfera y que esto provoca más nubes, si las últimas se forman en cierta altura resulta un enfriamiento —retroalimentación negativa— mientras que si son bajas hay calentamiento —retroalimentación positiva. Asimismo, la incertidumbre aumenta en la medida que la resolución de los modelos es mayor; es decir, en que baja de escenarios globales al ámbito regional y nacional. Específicamente, no sabe-



mos con precisión la magnitud del cambio climático que se esperaría para el año 2030, 2050 o 2100, ni el carácter, distribución geográfica, tiempo y costos precisos de los daños que ocasionaría o la respuesta de los sistemas ecológicos; ignoramos la probabilidad de que se produzcan cambios mucho más agudos que los esperados debido a efectos no lineales del clima y la factibilidad, costos y posibilidades de distintos escenarios de mitigación.

#### ¿Cómo contrarrestar el cambio climático?

Un aspecto nodal del cambio climático es la llamada inercia del clima, la cual se debe a que varios de los efectos predichos tardarán décadas, centurias y hasta milenios para manifestarse en toda su magnitud. Específicamente, una reducción en el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero requiere décadas o centurias para estabilizar las concentraciones atmosféricas, las cuales,

a su vez, toman varios siglos para estabilizar la temperatura. Algunos cambios asociados, como el aumento del nivel del mar, continuarán por más de un milenio mientras que otros, como el derretimiento de grandes masas de glaciares en la Antártica, pueden ser eventos irreversibles. En otras palabras, nuestras acciones actuales conducen a futuros efectos de gran magnitud. También por la inercia climática, mientras más tiempo tardemos en reducir las emisiones, más estrictos deben ser los recortes para estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero. El patrón temporal de las reducciones, y

no sólo su valor absoluto, son claves para determinar los niveles de equilibrio esperados de esas concentraciones. Como dato ilustrativo, necesitaríamos reducir las emisiones anuales entre treinta y sesenta por ciento respecto a su valor actual durante los próximos veinte o cuarenta años, y continuar su reducción hasta el 2100, para lograr que el clima se estabilice en una concentración equivalente a poco más de dos veces el nivel preindustrial de CO<sub>2</sub>.

Además, la inercia climática es un fuerte argumento en favor de seguir el llamado principio precautorio, bajo el cual se priorizan las acciones de corto plazo para



CUADRO 3. MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

México emite anualmente 188 millones de toneladas de C equivalente, lo que representa cerca de dos por ciento de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y lo ubica como el noveno país en este rubro a nivel mundial. Su contribución per cápita es pequeña respecto a los países desarrollados, pero en el contexto del tercer mundo, es de las más elevadas, por su gran dependencia en los combustibles fósiles y las altas tasas de deforestación —que aportan 29% de las emisiones totales. De seguir las actuales tendencias, las emisiones del país podrían aumentar cincuenta por ciento para el año 2010, lo cual puede ocasionar grandes sequías y reducción en la superficie apta para el cultivo. Aumentarían los riesgos de inundaciones y se producirían cambios en la distribución geográfica de más de la mitad de los bosques. Asimismo, se estima que habrá gran inestabilidad para la vida silvestre, reorganizaciones en los ecosistemas con el surgimiento de nuevos predadores y parásitos, y varias especies deberán convivir en territorios menores que los actuales. En México existe un potencial técnico y económico de mitigación de emisiones muy importante. Desde la década de los años ochentas, los estudios muestran que podría reducirse significativamente el crecimiento de las emisiones por el uso de energía y convertir al sector forestal en un importante sumidero.

contrarrestar el cambio climático como precaución ante posibles catástrofes —aún desconociendo la magnitud precisa de los impactos esperados.

#### La adaptación y la mitigación

Existen dos tipos de estrategias generales para enfrentar el cambio climático: la adaptación y la mitigación. La primera consiste en el conjunto de acciones que se deben realizar para minimizar los impactos esperados del cambio climático —por ejemplo, desarrollo de variedades de cereales más adaptados a las sequías, subir el nivel de los diques para contener el esperado aumento en el nivel del mar, etcétera. Estas medidas tendrán que darse de un modo u otro, pues ya estamos en un mundo más caliente. Sin embargo, por sí solas no serán suficientes para contrarrestar los efectos negativos.

El debate sobre el cambio climático pasa inexorablemente por la necesidad de reducir —o mitigar— en forma significativa las emisiones de gases de invernadero. Aquí, se abren una serie de interrogantes éticas, técnicas, económicas y políticas sumamente complejas, cuyas respuestas requieren la participación comprometida de todos los sectores sociales. Algunas de las más inmediatas son: ¿qué opciones de mitigación existen y cómo se podrían combinar de manera óptima en el futuro?, ¿cuál es el costo social y económico de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero?, ¿cómo se distribuirá la reducción entre los diferentes países y durante el tiempo?, ¿quiénes tendrán que pagar los costos?

Es difícil, y políticamente oneroso, realizar medidas exclusivamente dirigidas a adaptarse o a mitigar el cam-

bio climático cuando existen problemas apremiantes de corto plazo. Por ello, debe buscarse estrategias que ayuden a resolver ambos tipos de problemas simultáneamente. Por ejemplo, aplicar estándares más estrictos para vehículos con el fin de reducir la contaminación urbana y mitigar el cambio climático. Conservar y manejar sustentablemente los bosques contribuye a conservar la biodiversidad, los suelos y las cuencas hidrográficas, aunado a que evita emisiones de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

#### Las oportunidades de mitigación

Globalmente, cada año se emiten a la atmósfera más de once mil millones de toneladas de carbono —11 gigatoneladas de carbono o GtonC— equivalentes de gases de efecto invernadero. Las emisiones globales de dióxido de carbono alcanzan aproximadamente 7.4 GtonC por año, 6.4 por la producción de energía y una por la deforestación. Un mapa mundial de la distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero por región muestra una situación compleja, la magnitud de las emisiones tienen importantes variaciones tanto por su monto total y per cápita, como por su origen —energético o por procesos de cambio de uso del suelo. También son complejas las alternativas para reducirlas significativamente. Actualmente ochenta por ciento de toda la energía consumida en el mundo viene de combustibles fósiles —en México noventa y dos por ciento de la energía utilizada proviene de estos combustibles (cuadro 3). Hay intereses económicos y políticos muy profundos asociados a su uso —como quedó patente en la guerra contra Irak— y todo un modelo de desarrollo económico, tecnológico y social tejido en torno.





De hecho, para contrarrestar el cambio climático se requieren acciones integradas, decisivas y urgentes, lo cual significa un profundo cuestionamiento hacia este modelo. Debemos abandonar el uso indiscriminado de combustibles fósiles y el dispendio energético, también la agricultura contaminante e intensiva en uso de insumos químicos y altamente subsidiada energéticamente, se debe frenar la desaparición y degradación sistemática de los bosques y selvas naturales y dejar de fomentar las desigualdades en los patrones de consumo, tanto entre los países como al interior de éstos.

Para examinar cómo contrarrestar —o mitigar— el cambio climático se construyen escenarios globales, regionales y nacionales en los que se estima la evolución esperada de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos ejercicios suponen integrar en modelos con distinto grado de sofisticación, proyecciones económicas, demográficas, tecnológicas y sociales, en un conjunto amplio de escenarios futuros. Se trata de anticipar las trayectorias de no tomarse ninguna acción específica sobre cambio climático —los escenarios de referencia— y las trayectorias posibles al incluir acciones concretas para mitigarlo —los escenarios de mitigación. En un ejercicio realizado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sobre escenarios futuros se concluyó, por un lado, que

entre el año 2000 y el 2010, pueden lograrse reducciones por menos de 100 dólares por tonelada de carbono —como referencia, el costo de un barril de petróleo equivale a 150 dólares por tonelada de carbono— alcanzando entre 1.9 y 2.6 GtonC por año en el sector energía y aproximadamente una GtonC por año en el sector forestal. Esto significa cuarenta por ciento de las actuales emisiones globales. Asimismo, se concluyó que hay un estrecho vínculo entre mitigación del cambio climático, mejor manejo ambiental y desarrollo sustentable.

Las principales medidas de mitigación tecnológicas incluyen el uso eficiente de energía —por ejemplo, reemplazar focos incandescentes por compactos fluorescentes, promover automóviles más eficientes y plantas de generación termoeléctrica de ciclo combinado— y la transición hacia las fuentes renovables de energía. Recordemos que la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y de la biomasa no añaden en forma neta gases de efecto invernadero a la atmósfera.

En el sector forestal son muy importantes las acciones destinadas a conservar los bosques existentes y aumentar la densidad de biomasa de los actuales sistemas de uso del suelo. La primera alternativa es clave, pues estamos perdiendo quince millones de hectáreas al año —aproximadamente 670 000 hectáreas tan sólo en México. Cada hectárea de selva convertida en potrero lleva asociada una pérdida de entre cien y doscientas toneladas de carbono en los primeros cinco años. Recuperarlo implica plantar entre treinta y setenta hectáreas de bosque. La segunda alternativa significa la reforestación de áreas degradadas, el establecimiento de plantaciones comerciales —para obtener madera, papel o energía— y el impulso a los sistemas agroforestales.

Es importante recalcar que los estudios de mitigación en diversas escalas muestran que existe una gran cantidad de medidas —conocidas como de no arrepentimiento o *no regrets* en inglés— que son costo efectivas. Es decir, deberían aplicarse aún sin tomar en cuenta el cambio climático.

Finalmente, debe enfatizarse que el cambio en las tecnologías es necesario pero no suficiente. Se requiere trabajar en los marcos regulatorios que permiten o impiden el desarrollo de las distintas opciones, en esquemas de incentivos y penalizaciones a las más contaminantes. También es necesario realizar cambios fuertes en nuestro estilo de vida dominante, utilizar mucho más los transportes públicos, bicicletas y otros medios de transporte,

reducir el consumo superfluo de recursos, orientarse hacia una producción de alimentos orgánicos y con énfasis en la autogestión local, promover el manejo sustentable de los bosques, entre otras medidas.

#### Las dimensiones ética y política

La búsqueda de soluciones al cambio climático abrió un debate en el frente ético con preguntas como ¿cuál es el máximo nivel de emisiones de cada país o de cada habitante de la Tierra?, ¿debemos contar el efecto actual o el acumulado de las emisiones?, ¿qué nivel y costo tendrán las reducciones de emisiones para los países y grupos sociales actuales y futuros? o ¿cuáles son las implicaciones para cuestiones de equidad intra e intergeneracional?

Las responsabilidades del problema son abrumadoramente claras. Históricamente, alrededor de noventa por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero provienen de los países industrializados. De hecho, éstos —específicamente los Estados Unidos—, acostumbrados al dispendio, han agotado la capacidad de los sistemas naturales para neutralizar las emisiones, ahora deben ser artífices y ejemplo en las reducciones. Por su parte, los países en vías de desarrollo necesitan otros paradigmas para alcanzar niveles de vida aceptables para el conjunto de su población. En suma, se necesita un amplio conjunto de acciones de todos los sectores, partiendo de las responsabilidades comunes pero diferenciadas en el problema del cambio climático. Desafortunadamente, en la práctica hay diferencias fundamentales entre países y sectores sobre cuándo y cómo actuar, qué nivel de urgencia se tiene, qué profundidad deben tener las medidas, qué tipo de medidas, de enfoques y de compromisos deben establecerse. Responder adecuadamente al cambio climático obliga, en lo inmediato, ejecutar acciones que sigan una lógica de largo plazo, lo cual encaja cada vez menos en las limitadas agendas y urgencias políticas de cada cuatrienio o sexenio.

Por estos motivos, alcanzar acuerdos internacionales en materia de cambio climático es una tarea titánica. El primer tratado importante firmado internacionalmente fue la Convención del Clima, que en 1992 estableció la responsabilidad de los países industrializados en la génesis del cambio climático y subrayó la necesidad de poner un techo a las emisiones de gases de efecto invernadero de modo que sus concentraciones se mantuvieran en niveles seguros para el planeta. Se hizo énfasis en rela-



ciónar las estrategias de mitigación del cambio climático con el desarrollo sustentable. Como esa convención no contemplaba compromisos concretos de reducción de emisiones, en 1997 se propone el Protocolo de Kyoto, donde se establece por primera vez la meta de reducir las emisiones de los países industrializados en cinco por ciento respecto a su nivel de 1990 para el periodo entre el 2008 y el 2012. Además, se instauro el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), que permite la colaboración entre países en vías de desarrollo y los industrializados en la reducción de emisiones. Cabe destacar que el MDL estipula que sólo serán aprobados aquellos proyectos que demuestren que la mitigación de emisiones o captura de carbono van acompañados con claros cobeneficios de tipo ecológico y social —la llamada cláusula de sustentabilidad. En otras palabras, se buscan proyectos que contribuyan a resolver el problema del cambio climático, generen empleos locales e impulsen la participación social y la restauración ecológica de sitios degradados. Así, las estrategias de mitigación deben ser compatibles con las necesidades y requerimientos de desarrollo sustentable de los países del llamado tercer mundo. De hecho, mundialmente se han desarrollado una centena de proyectos piloto energéticos, forestales y agrícolas de mitigación de emisiones de gases, los cuales permitirán mejorar el entendimiento de cómo combinar los benefi-

cios sociales y económicos locales con la protección del ambiente local y global.

El proceso de negociación del Protocolo de Kyoto, que tomó más de siete años, culminó en febrero del 2005 cuando entró en vigor después de la ratificación de Rusia. Estados Unidos, responsable de un cuarto de las actuales emisiones, y Australia, principal exportador mundial de carbón mineral, decidieron no ratificarlo, consecuentes con la política del primero de boicotear cualquier esfuerzo para reducir el consumo de combustibles fósiles. El Protocolo de Kyoto, a pesar de ser incipiente, representa una base para negociar futuras reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero. La pérdida de grandes masas de hielo en las zonas polares, el retiro de los glaciares y el aumento de la incidencia de fenómenos naturales como huracanes deberían ser incentivos suficientes para negociar compromisos mucho más fuertes de largo plazo que incluyan a los grandes países emisores como los Estados Unidos.

#### Retos para la investigación en ecología global

Nuestro planeta sufre un grave impacto ambiental producto de las actividades humanas. De hecho, podría aseverarse que el futuro de la Tierra, tal como la conocemos, está estrechamente ligado a las decisiones que en este siglo tomemos. La sustentabilidad del globo terráqueo depende de la adecuada articulación de las decisiones de miles de millones de habitantes —los cuales viven mundos social, cultural y ambientalmente muy distintos—, desde sus ámbitos locales hasta los niveles nacional, internacional y global. Tendremos que aprender a trabajar en la unidad de la diversidad.

La ecología global es un área de investigación relativamente reciente. Plantea retos muy serios en términos de las estrategias y métodos de investigación científica y su vinculación con la sociedad. Encontrar soluciones efectivas al problema del cambio climático global pasa por revisar en forma integrada aspectos científicos, téc-



nicos, económicos, políticos y éticos con una amplia gama de actores sociales, y con ellos generar estrategias de comunicación-acción. En estas circunstancias, no puede mantenerse la visión convencional de los científicos como expertos ubicados en sus torres de marfil, que proporcionarán las soluciones y alternativas al resto de la sociedad. Al contrario, como enfatizan Funtowicz y Ravetz, Lubchenco y otros científicos, se necesita un nuevo contrato social de la ciencia o una ciencia post-normal. Como científicos, no podemos proporcionar respuestas absolutas sobre cuáles serán las consecuencias concretas del cambio global para grupos específicos en regiones particulares del planeta. Tampoco podemos realizar experimentos controlados y repetibles para examinar la bondad de las predicciones. Simultáneamente, existe la urgencia de actuar de inmediato para evitar que se agraven las consecuencias del cambio climático. En suma, se requiere una nueva aproximación científica que fortalezca los enfoques interdisciplinarios y sistémi-

cos, que busque un entendimiento integrado y en múltiples escalas de los problemas, basado en la participación y comunicación con los diferentes actores sociales. Parafraseando a Kuhn, hablamos de la necesidad de una verdadera revolución científica, que plantea interesantes retos y sin duda constituye otra de las actuales fronteras de la ciencia.

Por último, y como moraleja, también debería quedarnos claro que un futuro catastrófico para el planeta no es inevitable. Existen una serie de opciones para cambiar el rumbo que llevamos, alternativas de manejo de recursos, de energía y de organización social que nos acercan a sistemas socioambientales más sustentables. Actualmente, miles de organizaciones y grupos aportan luces de esperanza en todas las escalas proponiendo, probando e impulsando este tipo de alternativas. Entonces, la tarea de todos es vencer el fatalismo y participar activamente para impulsar proyectos de relación de los seres humanos con la naturaleza verdaderamente sustentable. ✨

**Omar Raúl Masera**

Centro de Investigaciones en Ecosistemas,  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Campus Morelia.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gallopín, G. 2001. *Science and technology, sustainability and sustainable development*. Comisión Económica para la América Latina (CEPAL), Santiago de Chile.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Cambridge University Press, Nueva York.

Jaramillo, V. 1994. "El cambio global: interacciones de la biota y la atmósfera", en *Ciencias*, núm. 35, pp. 4-14.

Masera, O. R., A. D. Cerón y J. A. Ordóñez. 2001. "Forestry Mitigation Options for México: Finding Synergies Between National Sustainable Development Priorities and Global Concerns", en *Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change*. Special Issue on Land Use Change and Forestry Carbon Mitigation Potential and Cost Effectiveness of Mitigation Options in Developing Countries, vol. 6, núms. 3-4, pp. 291-312.

Ravetz, J. y S. Funtowicz. 1999. "Post-Normal Science, an insight now maturing", en *Futures*, núm. 31, pp. 641-646.

Sheinbaum, C. y O. R. Masera. 2000. "Mitigating Carbon Emissions while Advancing National Development Priorities. The Case of Mexico", en *Climatic Change*, vol. 47, núm. 3, pp. 259-282.

Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco y J. M. Melillo. 1997. "Human domination of earth's ecosystems", en *Science*, núm. 277, pp. 494-499

#### IMÁGENES

P. 5: Richard Misrach. *Fuego en el desierto* # 249, 1985. P. 7: Ray Charles. *Escultura sin pintar*, 1977. Pp. 9 y 14: Yann Arthus Bertrand. *Earth from above, May 31 y August 17*, 2001. P. 10: Guy Bourdin. *Sin título*, 1978. Pp. 12 y 13: Nancy Holt. *Sun tunnels*, 1977.

**Palabras clave:** Cambio climático global, mitigación, ecología global.

**Key words:** Global warming, mitigation, global ecology

**Resumen:** En este artículo se analizan los principales elementos del cambio climático global, la evidencia científica, las incertidumbres, los posibles impactos, y las soluciones planteadas con sus dilemas éticos y políticos asociados.

**Abstract:** In this paper we analyze the main aspects of the global warming, the scientific evidence, the uncertainties, the potential consequences and the proposed solutions along with their ethical and political dilemmas.

Omar Raúl Masera es investigador titular del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM, donde dirige el Laboratorio de Bioenergía. Obtuvo la licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM y los grados de Maestro y de Doctor en la Universidad de California, Berkeley, Premio Nacional para Jóvenes Científicos de la Academia Mexicana de Ciencias en Investigación Tecnológica. Ha sido asesor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el Programa de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Programa de las Naciones Unidas sobre Desarrollo.

**Recepción:** 19 de junio de 2004, última versión 18 de octubre de 2005.