

## La ecología del cambio climático

*Chris Bright*

En los primeros años de la década de los ochenta, el fuego y el agua causaron grandes devastaciones en todo el mundo. En Sudáfrica, la reserva de caza de Klaserie se secó y 33.000 animales salvajes murieron de sed; en la vecina Botswana, se redujo en un tercio la superficie del inmenso humedal del delta del río Okavango. Grandes extensiones de bosque bajo húmedo fueron pasto de las llamas en Borneo, acaso en su primer incendio de la historia, y también ardieron 350.000 hectáreas en el este de Australia. En el Pacífico central, aguaceros torrenciales en la isla de Kiririmari, antigua Christmas acabaron con una colonia de 17 millones de aves marinas, en tanto que más al este desaparecían agrupaciones de plancton, provocando una catástrofe entre las especies de peces a las que sirven de alimento, y perecieron arrecifes coralinos.<sup>1</sup>

En un mundo en el que cada vez quedan menos espacios naturales, el impacto de tal devastación ecológica sobre la propia naturaleza se ha convertido en un problema social. Las áreas naturales que todavía quedan en la Tierra contienen las mayores reservas de riqueza en evolución de todo el planeta. Aparte su valor intrínseco, va en aumento la evidencia de que estas áreas crean riqueza en el sentido estricto de la palabra: no sólo nos proporcionan combustible, pescado o plantas medicinales nuevas, sino que además conservan las funciones naturales básicas de toda la actividad económica. (Ver Capítulo 6). La importancia de fenómenos

naturales como la polinización, que posibilita la agricultura, y el ciclo purificador del agua, elemento éste sin el que los centros urbanos no serían posibles es tan grande, que estos y otros fenómenos constituyen servicios de un valor poco menos que incalculable para la sociedad. Sin ellos, la vida sería prácticamente imposible.

Existe otra dimensión social, más ominosa, de las devastaciones de los primeros años del decenio de los ochenta: puede que no se haya tratado de una catástrofe totalmente natural. Se han relacionado muchos de los trastornos con el fenómeno meteorológico llamado «El Niño» (en alusión al Niño Jesús, porque da comienzo en las fechas navideñas). El Niño se manifiesta con la entrada de una corriente cálida en las aguas normalmente frías cercanas a las costas de Ecuador y Perú. Ese fenómeno está asociado a un clima inusual en el Pacífico occidental, y el conjunto de masas y corrientes de aire tiene una tendencia centrífuga, por lo que es posible, que después de todo El Niño pueda recomponer una buena parte del clima global. En enero de 1996, un programa estadístico de ordenador que estudió el fenómeno llegó a la conclusión de que, aunque las condiciones de El Niño forman parte del clima natural del planeta, es probable que su mayor duración e intensidad en épocas recientes no pueda atribuirse a la naturaleza por sí sola.<sup>2</sup>

Los últimos fenómenos El Niño están tal vez vinculados a otra variable climática que parece actuar de forma no natural: el cambio de temperatura. Ha habido una tendencia generalizada al aumento, año tras año, de la temperatura media global, desde unos 14,5°C en 1866, año en que se inician las mediciones fiables, a cerca de 15,4°C en 1995, el año más caluroso registrado. (Ver Gráfico 5-1). Esta tendencia está estrechamente relacionada con un incremento de los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero, sobre todo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que se libera en grandes proporciones con la combustión de carbón y derivados del petróleo. El dióxido de carbono es uno de los componentes naturales de la atmósfera, pero las concentraciones actuales son del orden de 360 partes por millón, lo que supone de un 25% a un 30% más que cualquier concentración anterior durante los últimos 160.000 años.<sup>3</sup>

No hay pruebas convincentes de que esta tendencia al calentamiento global se deba a causas distintas de las propiamente naturales. Pero tanto la modelación informática de avanzado desarrollo como las mediciones reales de la atmósfera coinciden con terca exactitud: en el ciberespacio, a los científicos les es posible rela-

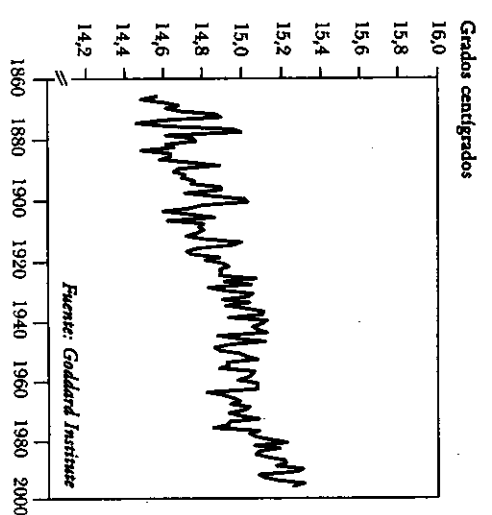


Gráfico 5-1. Temperatura media mundial, 1886-1995

ciónar la atmósfera con los mares y otros elementos esenciales de la estructura climática del planeta, a fin de plantear la pregunta de cuáles pueden ser los efectos del CO<sub>2</sub> añadido. Las respuestas de los ordenadores corroboran cada vez más la observación directa.<sup>4</sup>

En 1995, la coincidencia parecía muy cercana a la pura casualidad; el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), grupo de más de 2.000 científicos y expertos en política reunidos por las Naciones Unidas a fin de aconsejar a los gobiernos sobre política del clima, llegó a la conclusión de que la actividad humana está produciendo un calentamiento global. En el futuro, este calentamiento oscilará, a juzgar por el IPCC, entre 1°C y 3,5°C al alcanzar el año 2100, según sean las proporciones de contaminación atmosférica. No es mucho en apariencia, pero la última vez que las temperaturas superaron substancialmente los niveles actuales, lo que aconteció hace 125.000-115.000 años, los hipopótamos llegaron a habitar en latitudes como la de las islas Británicas.<sup>5</sup>

Las probabilidades de rápido cambio climático no son sólo materia de hipótesis académicas. Existe una realidad creciente de evidencias irrefutables de alteraciones climáticas muy rápidas en el pasado de la Tierra, incluso en eras geológicamente «recientes».

Hace alrededor de 11.600 años, al final de una glaciación muy intensa, la media global de temperaturas se disparó en unos 7°C en sólo 20-50 años. Las corrientes marinas cambiaron bruscamen- te, al parecer se secaron los lagos africanos y se incrementó el metano atmosférico, señal inequívoca de desplazamientos genera- lizados de las áreas vegetales, pues ese gas lo desprenden las plan- tas en putrefacción. En sólo el transcurso de una generación hu- mana, parece haberse producido un importante cambio climático.<sup>6</sup>

Los programas informáticos de climatología trabajan sólo a es- calas muy amplias, por lo que resulta difícil determinar de mane- ra específica las tendencias actuales. Los científicos, sin embargo, predicen que en general las latitudes de zonas templadas se calen- tarán mucho más que los trópicos. Los niveles del mar subirán, en gran parte debido a la expansión de las aguas cálidas, pero tam- bién en respuesta a la fusión de los hielos polares. Los vientos huracanados pueden tornarse más violentos y habituales, a causa de la energía adicional que ocasiona el calentamiento de los ma- res y de la atmósfera. Con esta concurrencia de circunstancias, a escala mundial el clima puede hacerse más extremado, lo que da- ría lugar a una mayor frecuencia probable de sequías, inundacio- nes y olas de calor.<sup>7</sup>

La investigación de los posibles impactos de estos cambios en los ecosistemas planetarios se ha convertido en empresa científica de gran importancia. Algunos estudios, unos con más certeza que otros, detectan ya la acción del cambio climático. Otros investi- gan futuros impactos ecológicos o probables factores de cambio. En general, a los ecólogos les preocupan dos aspectos del actual calentamiento que lo distinguen de pasadas fluctuaciones climato- lógicas. En primer lugar, el trastorno físico de muchas áreas natu- rales condiciona en gran manera las respuestas del ecosistema. (Imagínese una partida de ajedrez que se inicia con las piezas mal dispuestas en el tablero). El segundo aspecto consiste en la coin- cidencia con otras formas de degradación ecológica que incrementa considerablemente las posibilidades de resultados bruscos y arries- gados. (Imagínese en esa partida de ajedrez que uno de los con- trincantes dispone de varias reinas). Aun sin tener en cuenta estos dos factores de riesgo, vale la pena tratar de evitar un rápido cam- bio climático; pero con ellos, los peligros aumentan en enormes proporciones. Para investigar la ecología del cambio climático hay que intentar llegar a comprender tales riesgos.

### El efecto invernadero

A pesar de las considerables oscilaciones de temperatura que sin efectos perjudiciales aparentes pueden producirse en el transcurso de un día, de una estación o de un año, un impulso generalizado hacia arriba puede dar lugar a profundos impactos ecológicos. En muchas partes del mundo, una ligera elevación de la temperatura media anual del aire podría ser causa de un riesgo mucho mayor de proliferación de insectos, en detrimento tanto de los paisajes naturales como de los cultivos. Las aguas más cálidas podrían su- poner una alteración muy extensa de los ecosistemas acuáticos y un impredecible riesgo añadido a las principales pesquerías del mundo, que están ya siendo exploradas por encima de su capaci- dad a largo plazo. Los cambios inducidos por la temperatura en los regímenes de precipitaciones es probable que estén ahora con- tribuyendo a sequías más prolongadas en África, Europa y otras regiones. y la elevación de los niveles marinos invade humedales costeros, que figuran entre las áreas naturales más amenazadas del planeta.

Muchos de estos cambios se inician con simples efectos fisi- lógicos, como los que afectan al metabolismo de los vegetales. Dentro de los límites de su tolerancia a las temperaturas y supo- niendo que se den otras condiciones necesarias para su vida, una planta tenderá a crecer con más rapidez en un clima más cálido. A menudo se aprovecha esta circunstancia para afirmar que el cam- bio climático será «bueno», o que por lo menos no será necesaria- mente malo. Pero este tipo de extrapolaciones automáticas no nos dicen mucho en verdad acerca de los impactos ecológicos.<sup>8</sup>

Fuera del laboratorio, la salud de una planta puede estar limi- tada por muchos factores, de los que uno de los más importantes es el ataque de los insectos. El conjunto de relaciones entre vege- tales e insectos constituye un elemento básico que configura los ecosistemas terrestres. De los 1,82 millones de especies de seres vivos identificados hasta la fecha, 1,04 millones son insectos. Se han dado nombres distintivos a unas 325.000 especies vegeta- les «verdes» (fotosintéticas); en cambio, toda la línea de animales vertebrados (mamíferos, aves, peces, reptiles y anfibios) compren- den sólo unas 41.000 especies. Es probable que el número de vertebrados todavía por descubrir sea relativamente pequeño, al contrario de lo que sucede con los insectos, de los que decenas de millones de especies permanecen aún desconocidas. Y un número

todavía mayor de microorganismos esperan todavía ser identificados.<sup>9</sup>

Al igual que ocurre con los vegetales, el tiempo cálido acelera el metabolismo de los insectos: en los años más calurosos los insectos suelen desarrollarse más deprisa, se reproducen con más frecuencia y emigran antes. El gorgojo del cereal, por ejemplo, es una importante plaga que arrasa cultivos en Europa y en América del Norte. Durante los decenios pasados ha ampliado su radio de acción hacia el norte en ambos continentes, y ampliado las áreas donde se las arregla para producir más de una sola generación en el curso de un año. En la actualidad, los científicos atribuyen la causa principal de esa proliferación a los cambios de métodos agrícolas, pero las previsiones climatológicas para Europa sugieren que para el año 2020 el gorgojo emprenderá sus vuelos migratorios 25 días antes que en la actualidad y que puede ser capaz de asentarse en regiones de la Europa septentrional que raras veces visita ahora.<sup>10</sup>

En los bosques de Alaska y Canadá occidental, donde los años más cálidos son a menudo más propensos a la aparición de plagas, el calentamiento progresivo puede ser causa de propagación de la mariposa defoliadora *Choristoneura fumiferana*, una plaga característica de los retoños de píceas, cuyo agente es un gusano que se ha ido desplazando de este a oeste a través del continente. Este gusano, que ataca asimismo los retoños de pinos y abetos, provoca en la actualidad más pérdidas forestales que cualquier otro insecto en el Canadá. Explica con claridad cómo una alteración del clima puede favorecer a determinado insecto. Un solo brote de dicha plaga puede producir 7,2 billones de estos gusanitos si se dan los tipos de mutación normales en los insectos, que garantizan virtualmente la presencia de miles de millones de combinaciones genéticas raras. En los bosques boreales, los situados en las regiones más septentrionales del mundo, algunas áreas pueden llegar a ser lo bastante cálidas o secas para que en ellas habiten diversas especies de coníferas. Pero es casi seguro que siempre habrá un tipo genético de gusano capaz de adaptarse a determinado escenario climático similar al canadiense. Debido a su enorme arsenal genético, los insectos de este género están efectivamente «preadaptados» al cambio climático.<sup>11</sup>

También muchos organismos acuáticos son muy sensibles a la temperatura. En las corrientes de la costa del Pacífico septentrional de EEUU, temperaturas del agua superiores a los 19°C dan lugar a que un pez ciprínido del género *Notropis* compita con ven-

taja contra una variedad de la trucha arco iris (*Salmo gairdneri*), importante especie comercial. Con su alteración de estos equilibrios competitivos de la fauna acuática, el calentamiento del agua puede poner en peligro determinada especie aun cuando la temperatura permanezca holgadamente dentro de la tolerancia fisiológica de dicha especie. Son asimismo probables otras secuelas perniciosas. Mencionemos al efecto que en 1987 una de las especies tóxicas de plancton que intervienen en mareas rojas (estallidos de reproducción masiva de plancton capaz de envenenar extensas áreas) siguió una corriente inusitadamente cálida desplazándose de su hábitat de origen, el golfo de México, hacia la costa oriental de EEUU. Esto provocó una gran morranda de peces, junto con gravísimas dolencias nerviosas humanas por ingestión de moluscos contaminados.<sup>12</sup>

Con el calentamiento de las aguas marinas, estas alteraciones son posibles en cualquier parte. Algunas investigaciones recientes indican que las aguas litorales del Canadá occidental pueden calentarse en 2°C de aquí al año 2070, lo que reduciría el hábitat veraniego de los salmónidos del Pacífico en un 50% y eliminaría por completo su hábitat invernal. En efecto, el salmón se veía forzado a desviar su ruta migratoria hacia el norte, al mar de Behring; perspectiva cuyas consecuencias serían muy difíciles de predecir. Al alterar la distribución de especies, las fluctuaciones de las temperaturas acuáticas pueden romper importantes enlaces de la cadena alimentaria.<sup>13</sup>

Para ciertos animales, las oscilaciones de temperatura desempeñan un papel todavía más básico en la dinámica poblacional. En algunos peces, crustáceos y reptiles la temperatura ambiente favorece a determinados géneros en un periodo crítico del desarrollo embrionario. En ciertas tortugas, por ejemplo, las temperaturas más altas favorecen el que haya más hembras, y en proporción menos machos. El calentamiento puede estar haciendo ya que se descompensen las proporciones entre los dos sexos de ciertas poblaciones de tortugas hasta extremos tan graves como para amenazar su existencia. Entre las especies afectadas figura la tortuga boba (*Caretta caretta*), una de las clasificadas como amenazadas.<sup>14</sup>

Un mundo en calentamiento es probable que también se convierta en más lluvioso, si bien paradójicamente será posible que asimismo se incrementen las sequías. El ciclo hidrológico, como lo denominan los científicos, tenderá a enviar mayores masas de agua a las precipitaciones mundiales, pero la mayor cantidad de

éatas no se distribuirán de manera homogénea. Aunque los modelos climáticos no son lo bastante precisos para reflejar en mapas las precipitaciones con mucho detalle, en general se admite la probabilidad de que muchas áreas continentales se tornen más secas, en especial las que ya padecen sequías. Muchas regiones húmedas pueden convertirse en más húmedas aún. También es probable que la distribución temporal de las precipitaciones sea asimismo heterogénea: la lluvia puede «concentrarse» en aguaceros más fuertes que en la actualidad.<sup>15</sup>

Quizá sea la sequía la mayor de las amenazas provenientes de alteraciones en el ciclo hidrológico, como ya lo empiezan a indicar algunos estudios del problema en diversas partes del mundo. Uno de esos estudios, realizado el pasado junio por el IPCC, llegó a la conclusión de que el cambio climático eliminará el 85% de los humedales que todavía quedan en España y Grecia. Los humedales mediterráneos están ya en gravísimo riesgo a causa de la sequía y de las demandas de agua para riego agrícola y consumo urbano. Desde 1965 se han perdido en España dos tercios de sus humedales interiores.<sup>16</sup>

Las sequías, incluso las de poca intensidad relativa, pueden entorpecer el desarrollo de las plantas y hacer que proliferen los ataques de insectos o extender la morbilidad vegetal. En el abeto balsámico *Abies balsamea*, importante conífera de los bosques boreales de América del Norte, la escasez de humedad puede ser causa de que se tripliquen las concentraciones de azúcar en los retoños nuevos. Esto favorece la alimentación de la plaga de *Choristoneura fumiferana* que con frecuencia crece más en años secos. En algunos casos, la penuria de humedad puede eliminar el equilibrio entre el árbol y un hongo normalmente inofensivo que habita en su interior; en efecto, el hongo puede convertirse en otra enfermedad más.<sup>17</sup>

En las peores circunstancias, la sequía acaba por ser causa de desertización: la vegetación se atrofia, dejando los suelos expuestos a la erosión del viento y de las escasas lluvias que todavía pueden caer. Los suelos restantes absorben cada vez menos agua, lo que agrava al máximo la erosión producida por las escorrentías. La maleza se convierte en terreno de marojos dispersos y luego en estéril tierra endurecida. En condiciones extremas esta desertización es, a todos los efectos, irreversible. Es posible que unos 20 millones de km<sup>2</sup>, o sea el 15% de la superficie de tierras emergidas del planeta, estén ya afectados por algún grado de desertización, so-

bre todo en la China noroccidental, el Asia central y el Sáhel africano. (En la citada superficie se incluyen algunos desiertos naturales menos extremados; los desiertos propiamente dichos cubren alrededor del 30% de la superficie terrestre del mundo). Es posible que también en Europa se estén dando las primeras etapas de desertización: en España, Portugal, Italia y Grecia. Como causas principales de gran parte del problema se suelen citar el consumo abusivo de pastos, la corta de leña, el sobrecultivo y la desviación de cursos naturales de agua. No obstante, es la larga sequía generalizada lo que en África y ahora en Europa se ha convertido en factor importante entre los que conforman el conjunto de riesgos.<sup>18</sup>

Incluso donde parece que todavía hay suficiente agua, los cambios de ciclo hidrológico podrían ser ecológicamente caóticos. Las colonias de fauna acuática de ríos y arroyos, pongamos por caso, se forman a menudo a base de un régimen determinado de caudal de agua: tales trastornos hidrológicos pueden alterar la agropación de especies de un río.<sup>19</sup>

Los bosques tropicales pueden asimismo estar amenazados por cambios parecidos, aun cuando los modelos climáticos no pronostiquen el riesgo de que esos bosques se sequen. Investigaciones llevadas a cabo en selvas tropicales de Centroamérica han demostrado que el producto de los árboles frutales suele adaptarse con precisión al régimen de lluvias: una estación lluviosa de corta duración puede dificultar el florecimiento de una planta incluso con humedad todavía disponible para el crecimiento vegetal. Muchos árboles de bosques tropicales florecen sólo cada pocos años; los que dan fruto año tras año son por lo tanto de importancia vital para la comunidad humana. Si los cambios del régimen de precipitaciones hacen que algunas especies vegetales deriven su florecimiento a un ciclo más lento, las consecuencias podrían ser desastrosas para los insectos que polinizan las flores y para las aves y mamíferos que se alimentan de los frutos. Los cambios de régimen de precipitaciones durante El Niño de 1986-1987 pueden haber sido la causa de la extinción del sapo dorado, que habitaba en el alto bosque nuboso de Costa Rica y necesitaba como hábitaculo de cría los charcos formados por las lluvias primaverales. Este tipo de alteraciones podrían resultar dañinos para muchas criaturas muy delicadas de las selvas tropicales.<sup>20</sup>

Las temperaturas más cálidas ocasionarán asimismo una elevación de los niveles marinos. Casi toda esta elevación será debida a la dilatación térmica del agua propiamente dicha, pero también

contribuirá al fenómeno la fusión de parte de los hielos de los océanos glaciales Ártico y Antártico. El proceso está ya en plena marcha: durante los últimos 50 años más o menos, ha desaparecido de la Antártida un área similar a la de Puerto Rico (unos 8.000 km<sup>2</sup>). Es probable que el nivel medio del mar se haya elevado en unos 18 cm a lo largo de un siglo, y en la actualidad lo hace a razón de 0,1-0,3 cm al año.<sup>21</sup>

Los efectos de este proceso varían considerablemente según el tipo de costa, debido a la deposición de sedimentos fluviales, hundimiento paulatino del litoral y otros factores. Pero está claro que la subida de los niveles del mar plantea una amenaza inmediata a los humedales costeros, que son áreas de esencial importancia ecológica que ya experimentan en todo el mundo una destrucción del 0,5%-1,5% a consecuencia del desarrollo urbano e industrial. Una subida de los mares del orden que se pronostica podría provocar la inundación del 50% de los humedales litorales que todavía quedan en el planeta en el curso del próximo siglo. Estudios recientes han documentado ya una pérdida de humedales a beneficio del mar a lo largo del golfo de México y de la costa atlántica de EEUU.<sup>22</sup>

En las zonas tropicales y subtropicales, los mares en elevación serán una amenaza para los manglares, espesa vegetación de fuertes raíces que ocupan y protegen el área de mareas de cerca del 25% del litoral de los trópicos. Los manglares estabilizan las costas y sirven de hábitat a una gran diversidad de especies terrestres y marinas. Una de las razones por las que se prevén drásticas pérdidas de humedales costeros es la imposibilidad de recuperación: las áreas litorales de muchas partes del mundo figuran entre las zonas que han experimentado un desarrollo más intensivo. Incluso allí donde la topografía del terreno hubiera permitido una «migración» hacia el interior de las especies del humedal, a menudo el desarrollo les ha bloqueado el paso.<sup>23</sup>

Los riesgos para las costas pueden verse acentuados por un incremento de la frecuencia e intensidad de las tormentas marítimas tropicales. No está claro si la oleada de fenómenos tormentosos catastróficos que se viene produciendo a partir de 1990 representa ya una tendencia en este sentido, mas algunos científicos afirman que el calentamiento progresivo de mares y atmósfera puede contribuir al aumento de energía disponible para la acción de las borrascas. Según una estimación, una subida de 3°C a 4°C de la temperatura superficial del mar puede dar lugar a la formación de

huracanes con una potencia destructiva un 50% superior a la de los actuales y con vientos sostenidos de una velocidad tan elevada como los 350 km por hora. Quizá porque estas tormentas se consideran fenómenos «naturales», sus impactos ecológicos no han sido objeto de mucha atención. Pero incluso a su escala actual, su flujo perturbador es probablemente substancial en ecosistemas ya sometidos a intensos riesgos. Según un estudio, un 50% de aumento en la potencia destructiva de una tormenta aceleraría el final de muchos bosques tropicales de islas y costas.<sup>24</sup>

### Paisajes rotos

En el interior de un pinar de Carolina del Norte se han colocado 16 altas torres metálicas dispuestas en un círculo de 31 metros de diámetro. Si bien los árboles del interior de ese recinto no parecen ser distintos de los que quedan fuera, la cámara que forman hace pensar en los bosques del futuro. Bombean hacia fuera más dióxido de carbono de lo normal, lo suficiente para aumentar el contenido de CO<sub>2</sub> de la atmósfera interior del círculo a 550 partes por millón, que viene a ser el doble del que exista en los años del siglo XX. Esta es la situación que predicen muchos investigadores para mediados del próximo siglo XXI. Estudios de este tipo tratan de definir de qué modo podrían las plantas responder a una duplicación relativamente repentina de los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico. Los resultados, junto con estudios sobre el terreno de los efectos del propio calentamiento, van revelando un complejo de factores impactantes que podrían llegar a modificar la configuración de gran parte de los bosques y praderas del mundo.<sup>25</sup>

Los pinos del interior del citado recinto circular serán sometidos a observación a largo plazo, pero los científicos informaron ya de algunos resultados preliminares en 1995: entre éstos, un 65% de aumento en la fotosíntesis. Dado que el CO<sub>2</sub> es una de las materias primas que participan en la fotosíntesis, los investigadores predicen cierto grado de «fertilización de CO<sub>2</sub>» conforme el gas vaya acumulándose en la atmósfera. El hallazgo de Carolina del Norte fue una corroboración importante de experimentos de laboratorio mucho más sencillos, que a menudo detectan un crecimiento vegetal más rápido con niveles más elevados de CO<sub>2</sub>. Pero las variaciones de metabolismo hacen que distintas especies reaccionen de diversas formas; en algunas plantas el exceso de CO<sub>2</sub>

puede incluso ralentizar el crecimiento, porque incrementa la producción en que los vegetales «exhalan» carbono. La gama de respuestas de crecimiento documentadas en total va desde un 43% negativo a un 375% positivo.<sup>26</sup>

Esta gama tan amplia da a entender que en un hábitar particular, algunas plantas se desarrollarán bien con más CO<sub>2</sub>, mientras que otras lo harán deficientemente. Citemos como ejemplo los arces azucareros de los bosques de la zona oriental de América del Norte, que a menudo compiten con el pino blanco en arboladas mixtas. Como al arce le puede ir mucho mejor en una atmósfera enriquecida de CO<sub>2</sub>, la balanza ecológica puede inclinarse a su favor. Algunos estudios apuntan que categorías enteras de plantas son capaces de obtener similares ventajosas competitivas: las de ciclo anual pueden desarrollarse mejor que las perennes, y los árboles de hoja caduca mejor que los de hoja perenne. Al favorecer a unas especies en detrimento de otras, la proliferación de CO<sub>2</sub> podría sumarse a la contaminación, a la pérdida de hábitats y a un cúmulo de otros agentes impactantes que están deteriorando el mosaico vegetal del mundo.<sup>27</sup>

La potencialidad de proliferación de CO<sub>2</sub> es difícil de medir. Es posible que las plantas que muestran una fuerte respuesta inicial al CO<sub>2</sub> extra lleguen a aclimatarse: sus metabolismos pueden volver a sus regímenes anteriores. En los montes de la Italia central, existen fisuras que emiten de forma natural altos niveles de dióxido de carbono, y las plantas que viven en sus cercanías parecen haberse aclimatado por completo. Los científicos que estudian muestras de madera extraídas del núcleo de árboles adultos no han sido todavía capaces de determinar que se hayan producido ya efectos claros del incremento de CO<sub>2</sub> (si bien existe alguna evidencia de ello en áreas muy frías).<sup>28</sup>

Pero en un contexto ecológico más amplio, existen buenas razones para contemplar la proliferación de CO<sub>2</sub> como otra dimensión significativa de riesgo. Uno de los efectos del proceso que se observa comúnmente es una caída de las concentraciones de nitrógeno en los tejidos vegetales, ya que la absorción de nitrógeno por una planta puede no guardar el mismo ritmo que la mayor absorción de carbono. Esto hace que los tejidos vegetales sean menos nutritivos, lo que a su vez puede afectar al comportamiento de otros muchos organismos. Hace poco se descubrió en Canadá que una alameda que crecía en una atmósfera de CO<sub>2</sub> enriquecido albergaba unos hongos terrestres que liberaban esporas a

velocidades de dos a cuatro veces superiores a la normal. Dado que estos hongos se alimentan de detritus de plantas muertas, se aventura la explicación de que aportan más energía a la reproducción como respuesta forzada al alimento menos nutritivo. (Una reacción de este tipo podría ser una especie de póliza de seguro de evolución, ya que favorecería la propágación del hongo por todas partes si las condiciones de su hábitar local dejasen de serle favorables). Estos hongos desempeñan una importante función ecológica, pues su digestión libera nutrientes contenidos en los detritus vegetales: hongos más débiles podrían significar un ecosistema más débil.<sup>29</sup>

También las plantas menos nutritivas podrían afectar a insectos que se alimentan de vegetales. Algunos experimentos han demostrado que, por lo general, el crecimiento de los insectos se atrofia al comer plantas fértiles en CO<sub>2</sub>, pero como los bichitos pugnan por obtener el nitrógeno que necesitan, tienden a ingerir más alimento: un promedio del 44% en 19 estudios distintos. Esta alimentación compensatoria varía no obstante muchísimo, y las investigaciones actuales ni siquiera se aproximan a estimaciones fiables sobre cómo se desarrolla este proceso en la naturaleza. Casi todo el trabajo realizado hasta la fecha se ha centrado en insectos devoradores de hojas; no se sabe virtualmente nada acerca de otros tipos de insectos vegetarianos. Y tampoco pueden los científicos predecir los cambios de comportamiento de las sustancias aleloquímicas, que son las que generan las plantas para detenerse de los insectos que se alimentan de ellas y de la competencia de otras especies vegetales. Mas se sabe que los efectos de estas sustancias químicas varían en gran manera a temperaturas distintas.<sup>30</sup>

Es probable que la mayoría de los vegetales simplemente se aclimaten a niveles más elevados de dióxido de carbono. O puede que el efecto del follaje pobre en nitrógeno se «pierda» en gran parte entre otros fenómenos que actúan en los insectos comedores de plantas. Con todo, a pesar de todas las dudas implícitas en las investigaciones actuales, lo que está claro es que se trata de un trasfondo más en potencia. Supóngase que dos o tres especies de una colonia de árboles empiezan a crecer con más rapidez y no se aclimatan. Supóngase asimismo que los insectos que atacan comienzan a desviar sus preferencias alimentarias a otras especies vegetales que se hayan aclimatado y se encuentren ya en desventaja debido a que el CO<sub>2</sub> extra ya no impulsa su tasa de crecimiento.

De esta forma, poco a poco, una alteración sólo ligera de la química del aire podría reducir la riqueza de un bosque.<sup>31</sup>

Este tipo de fenómenos podrían intensificar los cambios ya en proceso a consecuencia del calentamiento. Los investigadores han documentado, en zonas del borde septentrional de los bosques boreales de Finlandia, norte de Canadá y Alaska, un mayor desarrollo arborícola a lo largo de los dos últimos decenios, además de avances del bosque más allá de la anterior línea de árboles, hacia la tundra. Los bosques parecen responder a una tendencia a la subida de las temperaturas mínimas anuales, es decir, a que los inviernos septentrionales sean un poco menos fríos de lo que solían.<sup>32</sup>

La «emigración de árboles» es una de las formas en que los bosques han respondido a alteraciones previas del clima mundial. Pero el desplazamiento de los bosques no es colectivo, pues es muy variable la capacidad de ocupación de nuevos hábitats por distintas especies de árboles. Después de la desaparición de las placas de hielo que cubrían gran parte del Hemisferio norte durante la última glaciación, por ejemplo, la picea blanca, confiera resistente al frío, que poliniza el viento y cuya semilla es ligera, puede haberse transportado a nuevos territorios a una velocidad vertiginosa de hasta dos kilómetros anuales como promedio, mientras que el castaño americano de zonas templadas y semilla pesada se abriría paso a sólo 100 metros por año.<sup>33</sup>

Los ecologistas prevén que habrá migración en ambos extremos de la zona boreal; es probable que los bosques avancen hacia la tundra en algunos puntos, retirándose a lo largo de sus límites meridionales. ¿Podrían por ello los bosques boreales adaptarse al cambio climático sólo con desplazarse hacia el norte? Por desgracia, la respuesta es no, por varios motivos. A la velocidad de calentamiento que se pronostica, todo el conjunto de un bosque diverso en especies habría de «mudarse» hacia el polo a razón de 1,5 a 5,5 km anuales a fin de mantener su régimen corriente de temperatura, lo que constituye una imposibilidad ecológica. (A la migración de la picea blanca pueden haber coadyuvado los vientos glaciales que no existen en nuestros días). Aun cuando tales velocidades de desplazamiento fuesen posibles, las condiciones del suelo en la tundra limitan muchísimo las posibilidades de colonización, en tanto que el calentamiento y mayor sequía de los puntos meridionales de la zona boreal es probable que conduzcan a muertes más frecuentes y rápidas de árboles: bosques muertos que podrían algún día ser ocupados por especies de zonas templadas. Los vas-

ros bosques boreales, que circundan el Ártico y cubren ahora cerca del 17% de la superficie terrestre del planeta, podrían eventualmente reducirse a un 10%-50% de su actual extensión.<sup>34</sup>

El tiempo frío es tan esencial para las distintas especies de árboles de los bosques septentrionales como lo son las fuertes precipitaciones para las selvas tropicales. Es cierto que gran parte de la flora nortéña ha sobrevivido en el pasado a bruscas oscilaciones climáticas, lo que habría dado lugar a una selección de diversidad genética bastante robusta entre las múltiples especies. Pero la evidencia obtenida sobre el terreno va manifestando ya algunos indicios de problemas de readaptación. Un estudio a largo plazo de la tundra de Alaska descubrió cierta reducción del número de especies durante la década de los ochenta, la más cálida registrada en esa zona. En Escandinavia las largas temporadas de crecimiento habituales en los años recientes parecen estorbar el que algunas especies vegetales alpinas pasen al estado de aletargamiento invernal, con lo que los capullos florales y los tejidos en desarrollo quedan expuestos a las heladas. Incluso es posible que las especies más resistentes no siempre beneficien al ecosistema en conjunto: en las regiones alpinas escandinavas, el desplazamiento a altitudes mayores de algunos arbustos puede reducir la vegetación de líquenes terrestres, alimento invernal básico del caribú.<sup>35</sup>

Es probable que una de las manifestaciones más importantes del cambio climático en las colonias vegetales del mundo sea la invasión por plantas «foráneas» no autóctonas, de especies que, por unas u otras razones, son capaces de beneficiarse de las nuevas condiciones climatológicas. Las especies foráneas pueden resultar peligrosas porque suelen llegar al nuevo hábitat sin las afecciones ni otros factores limitativos que mantienen su número a raya en sus ecosistemas naturales, y porque las plantas autóctonas pueden no haber desarrollado readaptaciones de vigor suficiente para defenderse de sus recién llegadas vecinas. Así, aunque a primera vista parezca que las intrusiones foráneas sean «buenas» para la biodiversidad, puesto que suman más especies al ecosistema, los efectos a largo plazo son en general lo contrario: las foráneas dominan a menudo a las nativas, e incluso a veces dan lugar a su extinción. La proliferación de plantas foráneas ha alcanzado cotas muy superiores a los tipos naturales de invasión, y es probable que el cambio climático acelere este proceso.<sup>36</sup>

Los fenómenos climáticos significan ya un factor muy importante en las invasiones de plantas. En la Australia nororiental, pon-



gamos por caso, el tiempo inusitadamente húmedo de los decenios de los setenta y los ochenta favoreció la expansión de la parkinsonia y del mezquite: vastas espesuras de estos arbustos foráneos cubren en la actualidad las que fueran tierras de pastos. Al sur, una fuerte sequía en los años noventa ha causado grandes estragos en el bosque autóctono y la mayor cantidad de luz que ha podido infiltrarse a través de la perforada cubierta verde ha favorecido una abundante proliferación de diversas trepadoras y arbustos foráneos, que pueden dificultar la regeneración del bosque. Más al oeste, a lo largo del litoral de los Territorios del Norte, se cree que una grave inundación de la cuenca del río Adelaida durante la década de los setenta ha constituido un factor desencadenante de la invasión de un arbusto neotropical, la *Mimosa pigra*. Lo que en otros tiempos fuera un rico y biológicamente diverso humedal de unas 45,000 hectáreas son ahora densos y monótonos campos de mimosa, lo que demuestra que los fenómenos meteorológicos extremados pueden activar alteraciones ecológicas a largo plazo.<sup>37</sup>

Es casi seguro que el calentamiento sucesivo dará lugar a riesgos adicionales de invasiones foráneas nocivas. En el oeste de Estados Unidos, los inviernos suaves y húmedos y los veranos secos que se pronostican para gran parte de la región pueden favorecer el desarrollo de malas hierbas como el *Bromus setalinus* y el cardo *Salsola kali tenuifolia*, dos invasores eurasiáticos que están ya muy extendidos. El *Bromus setalinus* por sí solo domina ya 40 millones de hectáreas de la zona occidental de América del Norte. En Australia, África y otras partes, las praderas naturales van retrocediendo ante la invasión de arbustos leñosos; las investigaciones preliminares sugieren que debido a su tipo tan sólo un poco distinto de fotosíntesis, los arbustos se beneficiarían ya de los niveles más elevados de dióxido de carbono.<sup>38</sup>

Aunque no es probable que ningún tipo particular de flora se pierda en todas partes, los bosques del mundo pueden resentirse de manera desproporcionada del clima cambiante y de las invasiones que son su consecuencia. Especies arbóricolas adaptadas a determinadas condiciones naturales corren el riesgo de desaparecer y grandes áreas de bosque pueden convertirse en pastizales. Según una estimación, el cambio climático pone en peligro nada menos que todo un tercio del área forestal mundial.<sup>39</sup>

### Plagas, agentes patógenos y vida natural

Los efectos del calentamiento no se limitan a los vegetales. También los animales y los microbios manifiestan su acción. Esto plantea una complicación inmensa en el cuadro general y reduce todavía más el equilibrio ecológico. Los insectos, tan sensibles en sus reacciones a las temperaturas, varían rápidamente sus radios de acción en respuesta a la meteorología cambiante. Un estudio reciente ha documentado el desplazamiento hacia el norte de la mariposa de Edith, *Euphydryas chalcedona* en el oeste de América del Norte. Un calentamiento de 0,6°C parece haber «desplazado» la mariposa unos 150 km hacia el norte en los últimos 100 años. En Costa Rica, una ola de calentamiento más reciente ha permitido al mosquito de la fiebre amarilla irrumpir en la cadena montañosa central del país, cuyo clima era antes demasiado frío para ese nocivo insecto, e instalarse en la mitad occidental del mismo.<sup>40</sup>

Todos los parajes del mundo presentan innumerables riesgos de esta clase. En la zona occidental de Estados Unidos, por ejemplo, un incremento de 2,5°C en las temperaturas anuales medias ocasionaría el que el áfido *Adelges piceae*, insecto invasor procedente de Europa que ataca al abeto balsámico, inviernara en el bosque de abeto alpino. Este insecto muestra un apetito voraz por ciertos tipos de agujas de coníferas. Su presencia en los bosques occidentales podría repetir el desastre de la parte oriental del continente, donde ha provocado la mortandad de áreas enteras de abeto en los Montes Apalaches. Más al norte, el fenómeno que normalmente acaba con los brotes de gusanos que atacan los retoños de coníferas son las heladas tardías, pues éstas destruyen los arbolitos nuevos de que se alimenta dicha plaga. La proporción es por ello inversa: con menos heladas, más proliferación del gusano. Actualmente en una zona del Canadá septentrional transcurrieron 18 años antes de que una helada en junio fuese lo bastante intensa para acabar con uno de tales brotes.<sup>41</sup>

Prácticamente todas las regiones de la Tierra albergan algunas especies de insectos —autóctonos o foráneos— que se adaptan con bastante precisión a los límites de su tolerancia a las temperaturas y a la humedad. Muchos de los insectos más nocivos para la agricultura, para los bosques y para la salud pública en todo el mundo son de procedencia tropical o subtropical. Casi por definición, su organismo está preparado para hacerlos capaces de desplazarse

junto con sus barreras térmicas. Y dada su habilidad para proliferar con rapidez, es presumible que muchas especies de insectos se trasladen a hábitats nuevos tan pronto como puedan disponer de ellos. En Europa, pongamos por caso, la velocidad de colonización de nuevos terrenos por insectos invasores parece ser por lo general superior a los 2 kilómetros anuales y a veces alcanza una rapidez tan asombrosa como los 100 kilómetros al año. En los insectos, esta facilidad de movimientos parece ser otra de sus formas de «preadaptación» al cambio climático.<sup>42</sup>

Por supuesto, también pueden desplazarse algunos animales de mayor tamaño conforme sus hábitats de siempre empiezan a reducirse o se les presentan nuevas oportunidades en cualquier parte. El sapo de la caña, al que es probable que beneficie el cambio climático, es un anfibio sudamericano de gran tamaño que se introduce profusamente con un mal concepto en los trópicos y en zonas reempladas y cálidas, con el propósito de que acabase con los insectos que arrasan las plantaciones de caña de azúcar. Este sapo demostró ser, por el contrario, una grave plaga de verterbrados predadores agresivos e indiscriminados y los animales que en potencia podrían a su vez ser sus predadores se ven disuadidos por las toxinas que desprende su piel. En Australia, donde el sapo dispone ya de condiciones muy ventajosas, la modificación climática pronostica una invasión muy extensa hacia zonas que se tornen más cálidas y húmedas.<sup>43</sup>

También es probable que el calentamiento de las aguas favorezca la proliferación de especies acuáticas foráneas. Los ecosistemas acuáticos de todo el planeta contienen peligrosas especies foráneas dispuestas a beneficiarse del cambio climático. Cabe citar los peces mozambiqueños del género tilapia, popular pescado de acuicultura, que han invadido los ríos y lagos de casi todas las regiones tropicales y subtropicales. La tilapia expulsa a los peces autóctonos de muchas de estas zonas, pudiéndose trasladar a aguas templadas con la subida de las temperaturas. Asimismo, a lo largo de la costa de California se ha atribuido ya al calentamiento del agua el desplazamiento hacia el norte de ciertas especies de moluscos.<sup>44</sup>

Un riesgo menos aparente es el movimiento de agentes patógenos y parásitos inducido por el cambio climático. Estos organismos desempeñan un papel en gran parte oculto, pero decisivo en cuanto a la configuración de un ecosistema, pues contribuyen a limitar las poblaciones de las especies que les sirven de huéspedes, con los que mantienen los equilibrios competitivos y las ecuaciones apropiadas

entre predadores y presas. Mas el cambio climático puede alterar estos equilibrios al disparar las tasas de infección o al favorecer la propagación de nuevas dolencias. En Tasmania, por ejemplo, es probable que una mayor abundancia de precipitaciones diese lugar, junto con unas temperaturas en ascenso, a la expansión de la *Phytophthora cinnamomi*, planta foránea propia de los hongos que constituye ya una amenaza para la flora autóctona de la isla.<sup>45</sup>

Muchos agentes patógenos son transmitidos por los insectos, por lo que pueden aprovechar la sensibilidad de éstos al clima. En las zonas septentrionales, los inviernos suaves son a veces preludio de abundantes y tempranas migraciones de áfidos, insectos diminutos que se alimentan de jugos vegetales, destruyendo plantas recién nacidas y propagando sus virus. Se teme que en Europa un importante grupo de organismos patógenos de cereales que transmiten los áfidos —el virus que amarillea y atrofia la cebada— no sólo se propague aprovechando temperaturas más altas, sino que además provoque infecciones en los sembrados de principios de temporada, lo que incrementaría en gran manera el estrago del virus en las tierras de cultivo.<sup>46</sup>

Puede que los insectos no tengan necesidad de emigrar para extender las plagas. El calentamiento puede hacer que se incrementen determinada población ya asentada de insectos, para beneficio de cualquier agente patógeno que albergue. Otro riesgo del calentamiento es el auge rápido del índice de desarrollo de patógenos, factor de considerable potencia en algunas dolencias humanas, como la malaria, en donde la esperanza media de vida del insecto vector puede ser tan corta que el agente patógeno no dispondrá siempre de tiempo para madurar antes de que el insecto muera. También inciden a veces otros factores. El mosquito que transmite la fiebre dengue, otra de las enfermedades infecciosas humanas, se atrofia con temperaturas más altas; lo que significa que ha de alimentarse con más frecuencia, incrementando así las ocasiones de infección. Tanto para los humanos como para los no humanos, un mundo más cálido es propenso a convertirse en un mundo de mayor morbilidad.<sup>47</sup>

### Tiempos rotos

El calentamiento rápido amenaza con romper tanto las relaciones de tiempo como las de espacio en cualquier comunidad. Según un

análisis reciente que abarca unos 300 años de datos de temperaturas recogidos de varias fuentes, es posible que el cambio climático esté ya afectando a los ciclos estacionales. El estudio consideraba patrones de temperaturas obvios y llegaba a la conclusión de que la secuencia de estaciones en el Hemisferio norte había empezado a cambiar rápidamente alrededor de los años veinte de manera irregular y por zonas. La primavera llega antes en algunas regiones y más tarde en otras; también el invierno se adelanta o retrasa.<sup>48</sup>

Los ecologistas van viendo ya los resultados de estos corrimientos de las secuencias estacionales. Un estudio de llegadas de aves canoras migratorias al estado de Nueva York, pongamos por caso, averiguó que 39 entre 76 especies llegan ahora mucho antes que alrededor de 1900. Asimismo, florecen antes seis especies de plantas autóctonas. En Canadá, las nidadas de ganso blanco a lo largo de la costa de la bahía de Hudson se incuban, como promedio, 30 días antes que en 1950.<sup>49</sup>

Pero con arreglo a un criterio ecologista, una estación es algo más que una temperatura determinada. El calentamiento no puede desplazar las estaciones en el calendario como tampoco puede trasladar los ecosistemas de un lugar a otro. En cambio, es probable que trastorne muchas cadencias estacionales. Entre los mecanismos más vulnerables se hallan las respuestas fotoperiódicas: relojes metabólicos que se ajustan según los cambios de estación a lo largo del día y de la noche. En muchas plantas de zonas templadas, las horas de luz en primavera ayudan al florecimiento o a que broten las hojas. El ajuste de tiempo de esta respuesta es a menudo muy preciso: incluso para una misma especie, una agrupación meridional puede dar una respuesta fotoperiódica que sea distinta de la de una septentrional. Esa precisión permite a los vegetales una sintonía fina de la producción de hojas de forma que coincida con las lluvias primaverales, o salvar la aparición de insectos herbívoros, o florecer a la llegada de los polinizadores. Pero esta estrategia funciona cuando está ajustada a las condiciones climatólogicas reales; cualquier cambio de secuencia de los días de lluvia o una primavera más cálida que acelere el nacimiento de insectos podría dejar la respuesta en suspenso, quizás en un grado lo bastante grave como para afectar a la subsistencia de determinada agrupación vegetal.<sup>50</sup>

Algunos animales, en especial las especies migratorias, poseen asimismo una respuesta fotoperiódica, que puede hacerlos más sensibles al mismo tipo de desajuste. El colibrí de cola ancha, por

ejemplo, se vale de la duración de la luz diurna para que le indique cuándo comenzar su migración primavera hacia los montes de la Sierra Nevada en el sudeste de EEUU. La llegada del pájaro coincide con el inicio del florecimiento de cierta vegetación subalpina, ajuste de tiempos que permite al colibrí alimentarse y a las plantas el ser polinizadas. Pero estas plantas no regulan su florecimiento por fotoperiodos, sino como respuesta a las escorrentías de agua de nieve en fusión. En condiciones de niveles dobles de CO<sub>2</sub>, la fusión primavera de nieve en la Sierra Nevada puede producirse dos meses antes de lo que lo hace ahora, con desastrosas consecuencias tanto para las plantas como para su polinizador.<sup>51</sup>

En los ecosistemas acuáticos puede sobrevenir un tipo similar de desarreglo. En la variedad *Oncorhynchus nerka* de salmón del Pacífico, el fotoperiodo puede contribuir a acelerar la migración río Columbia arriba en el noroeste de EEUU. En condiciones estables, esa respuesta podría constituir un valioso indicador de temperatura en los ramos situados más río arriba en los que desova el salmón, pero en el último medio siglo, más o menos, el río se ha calentado (debido a la construcción de pantanos, drenajes y otras interferencias en los tipos naturales de caudal). Un estudio reciente concluye que la rígida respuesta fotoperiódica puede hacer que el salmón no remonte el río con suficiente prontitud para compensar el calentamiento.<sup>52</sup>

También podrían quedar anulados otros mecanismos de migración: la bahía de Delaware es el lugar de parada y descanso más importante de la «ruta de vuelo» de la costa oriental de EEUU. Más de un millón de aves llegan a él en mayo en su recorrido desde los trópicos al Ártico. Es entonces cuando las aguas están lo bastante cálidas para estimular el apareamiento y desove del cenrollo. Estos crustáceos y sus huevos son lo que alimenta la etapa siguiente del viaje de las aves. La llegada de las aves al Ártico, a primeros de junio, tiene lugar con un ajuste de tiempos que hace posible que el anidamiento se produzca justo antes de la aparición de determinadas colonias de insectos, que son otra fuente importante de alimentación para ellas. A los ecologistas les preocupa que el calentamiento en el Ártico puede hacer que las poblaciones de insectos alcancen su máximo antes de lo que lo están haciendo ahora. En cambio las aves, con su itinerario ligado a la temporada de apareamiento del cenrollo, es probable que no fuesen capaces de reajustar su tiempo de llegada.<sup>53</sup>

Estas situaciones anómalas revelan una importante norma ecológica de doble contenido que afecta a las migraciones. Los vertebrados migratorios —se trate de aves que anidan en el Ártico o de salmónidos del Pacífico— están por lo general «encadenados» a su itinerario. Han de emigrar, y para lograrlo de manera satisfactoria necesitan de un ajuste exacto de la secuencia de tiempo. Ello los hace muy vulnerables al cambio climático. Pero las numerosas hordas de insectos migratorios —áfidos, saltamontes, langostas, etc.— están preparados para adaptarse sin transición a los trastornos migratorios. Para la mayoría de estas especies la migración es opcional: si las condiciones de su hábitáculo son adecuadas, se quedan en él. La migración de insectos parece casi siempre no ser sino una adaptación a situaciones inseguras y cambiantes.<sup>54</sup>

Las convulsiones de tiempos y espacios de un mundo en calentamiento no son aptas para la creación de nuevas comunidades estables, dada la ausencia de acomodados y equilibrios capaces de durar largos periodos de tiempo. Las agrupaciones vegetales nuevas pueden no disponer de agentes polinizadores o dispersores de semillas. Los brotes de insectos foráneos, libres de predadores o enfermedades, pueden asolar bosques y terrenos de cultivo. La biodiversidad que distingue a unos lugares de otros tenderá a ir desapareciendo conforme más y más recursos vitales sean consumidos por resistentes organismos oportunistas que sacan ventaja de la inestabilidad.

### Peligro multifacético

Es habitual imaginar que los riesgos ecológicos actúan por separado, pero nunca es así. Es probable que el cambio climático coincida con varias amenazas distintas que planteen problemas mucho más graves de los que hubiese podido coleccionar un simple estudio climático. Norman Myers, ecólogo estudioso de este tipo de coincidencias, explica que algunos de los problemas más serios pueden ser los más difíciles de prever: «Incluso los modelos climáticos más avanzados tienden a descartar, en virtud de su propia estructura, ciertas clases de acciones recíprocas sinérgicas del mundo real que conducen a situaciones límite. Lejos de conocer cómo incorporar tales acciones recíprocas complejas a nuestros modelos, hasta la fecha apenas sabemos cómo identificarlos y definirlos.»<sup>55</sup>

En algunos lagos del Canadá oriental, se manifiesta periódica-

mente un sinérgismo que festeronea el litoral de brillantes algas purpúreas. Se trata de un fenómeno relativamente nuevo, mas no de una invasión. La pigmentación brillante refleja los rayos ultravioleta (UV), con lo que reduce los índices de absorción de peligrosas radiaciones UV por las algas. Los rayos UV son uno de los componentes de la luz solar, pero gran parte de ellos los elimina por filtración la capa estratosférica de ozono: ahora famosa por el «agujero de ozono» ocasionado por las emisiones de clorofluorocarbonos y otras sustancias destructoras de ozono (ver Capítulo 9). Las algas se van adaptando a mayores niveles de radiación UV, pero las dosis extra no se deben primordialmente al debilitamiento de la capa estratosférica de ozono. Son efecto de la sequía.<sup>56</sup>

David Schindler, ecólogo de la Universidad de Alberta, se ha dedicado al estudio de esa clase de sequía en el Área Experimental de los Lagos (Experimental Lake Area = ELA) que consiste en un grupo de lagos del Ontario septentrional seleccionados para la investigación científica. A lo largo de las dos últimas décadas la ELA se ha calentado en aproximadamente 1,6°C y las precipitaciones han disminuido en un 25%; lo que significa un tipo de cambio de amplia consonancia con un escenario de CO<sub>2</sub> duplicado que es probable se avenge en el interior de América del Norte.<sup>57</sup>

Los cursos acuáticos de la zona se están secando, por lo que son menores las proporciones de detritus vegetales y otras materias orgánicas que afluyen a los lagos. Schindler averiguó que los detritus desempeñan una importante función en los lagos: parte de ellos se disuelve y el carbono orgánico disuelto (COD) absorbe rayos UV, impidiendo su penetración en el agua más allá de ciertas distancias. Durante este proceso, el COD se pierde, por lo que es necesaria su reposición constante a fin de mantener el escudo protector de radiaciones UV. Con el aporte menor de COD, los lagos se van haciendo cada vez más transparentes a los rayos UV. En los lagos boreales, la radiación UV-B (que son los rayos UV de longitud de onda más peligrosa que penetran en la atmósfera) es absorbida por lo habitual hasta 20-30 cm de profundidad, pero en los del ELA penetra hasta casi 1,5 metros.<sup>58</sup>

Algunos de los lagos del ELA fueron acidificados experimentalmente a fin de simular los efectos de la lluvia ácida. (La lluvia ácida, producto de la contaminación atmosférica procedente de la combustión de carbón y de los procesos metalúrgicos e industriales de diverso tipo, constituye un problema de grandes dimensio-

nes en los lagos boreales). La acidez deshacía el COD o le obligaba a agruparse por completo fuera de la masa de agua. El resultado fue una transparencia aún mayor a los rayos UV. En uno de los lagos, la radiación UV-B alcanzó casi 3 metros de profundidad. Por añadidura, la lluvia ácida real a veces reduce los niveles de COD todavía más por debajo que en los de la ELA. Schindler estima que, entre los casi 700.000 lagos del Canadá oriental, unos 140.000 adolecen ya de una profunda penetración UV.<sup>59</sup>

En un sinergismo tan destructivo como éste, varias fuerzas se combinan para producir un impacto mayor que el de sus efectos por separado. Los peligros de estas coincidencias son omnipresentes. La exposición a rayos UV es más acentuada en las latitudes superiores: precisamente donde se pronostican los mayores cambios de temperatura. Además, la contaminación atmosférica va acidificando los lagos boreales eurasiáticos tanto como los canadienses. Las temperaturas más altas estimulan la acidificación al acelerar el ritmo de descomposición del suelo, lo que disparará la concentración de compuestos ácidos de nitrógeno en las esorrentas de agua de lluvia.<sup>60</sup>

Pero el problema no se limita a estos riesgos o a regiones septentrionales. A mediados del decenio de los ochenta, en el sudeste de EEUU la contaminación del aire por ozono se unió a un tiempo caluroso y seco para producir pérdidas de la conífera *Pinus taeda*, sostén principal del sector forestal de la zona, valorado en 4.500 millones de dólares. (Aun cuando el ozono es componente natural de la estratosfera, a nivel del suelo, donde se desprende artificialmente en una reacción derivada de los tubos de escape de los vehículos, constituye un grave contaminante atmosférico). Similares sinergismos ozono-sequía pueden estar ya afectando asimismo a los bosques de las islas Británicas.<sup>61</sup>

Al igual que la sequía, también la contaminación atmosférica parece activar la proliferación de enfermedades y plagas, aunque no se conocen todavía bien los mecanismos precisos. Otra forma de contaminación, la de partículas metálicas, ha demostrado agravar la toxicidad de la lluvia ácida en el suelo y reducir la resistencia de las plantas a las agresiones de insectos. Los ecosistemas terrestres del mundo, contaminados por suelos tóxicos, agua acidificada y aire sucio, corren el peligro de ir perdiendo poco a poco su resistencia a la amenaza invisible del cambio climático.<sup>62</sup>

Otra amenaza de los sinergismos es la que suponen para los mares, como lo atestigua la situación de un ecosistema marino de im-

portancia básica: los arrecifes coralinos. En términos de biodiversidad, forman éstos el ecosistema más rico de los mares, segundado en riqueza de todo el planeta sólo superado por los bosques tropicales. Se ha calculado que por lo menos un 65% de las especies acuáticas marinas depende de los arrecifes en algún momento de su ciclo vital. Pero el coral es vulnerable en extremo a la acción del calor; los fenómenos El Niño de principios de los ochenta provocaron una masiva mortandad coralina en los arrecifes de todo el Pacífico, y pueden haber ocasionado la extinción de varias especies coralinas. Las temperaturas superficiales de los mares de los trópicos podrían subir en 1-2°C para 2050 o 2100. Un informe del IPCC explicó las consecuencias que ello tendría en el coral: «La magnitud de tal incremento, añadida a la rápida velocidad de cambio, elimina virtualmente todo margen de acción correctora.»<sup>63</sup>

Si se produce un calentamiento así, sin embargo, los efectos pueden incrementarse en grandes proporciones por una combinación de otros factores de riesgo. A consecuencia del último El Niño, epidemias de erizos y estrellas de mar están destruyendo muchos arrecifes coralinos ya muy deteriorados de los océanos Pacífico e Índico. En el Atlántico central y en el Caribe, las elevadas temperaturas del agua han motivado la proliferación infecciosa de una dolencia coralina extremadamente violenta. En algunos arrecifes caribeños, la sobrepesca ha reducido poblaciones de peces herbívoros en tales proporciones que las algas invaden y ahogan ahora corales que habían apenas iniciado su recuperación después de la devastación del huracán Allen en 1980.<sup>64</sup>

Y con la elevación de los contenidos de CO<sub>2</sub> atmosféricos, los mares absorberán más gas; lo que tenderá a reducir en sus aguas las concentraciones de carbonato cálcico, material que necesitan los corales para erigir sus estructuras. El CO<sub>2</sub> extra puede asimismo fertilizar algas y malas hierbas marinas, que están ya desplazando al coral en muchas zonas a consecuencia de la contaminación por nitratos. Tanto en los mares como en las tierras existen riesgos latentes de sinergismos que constituyen la principal amenaza de cambio climático.<sup>65</sup>

### Espacios naturales: conservación y reforma energética

Una de nuestras responsabilidades más perentorias es la protección de los espacios naturales que todavía quedan en el planeta. Estas

zonas son esenciales para toda actividad económica del mundo, con independencia de lo distanciada que parezca estar de lo «natural», y no se concibe tipo alguno de desarrollo que aminore esa relación de dependencia. No hay nada que sea capaz de reemplazar un ciclo hidrológico estable, una colonia polinizadora sana o la estabilidad ecológica en general que sólo los espacios naturales pueden aportar. Necesitamos estos lugares por motivos que son lo bastante evidentes como para satisfacer incluso al más insensible de los economistas, pero asimismo los necesitamos por razones que son difíciles de evaluar.

Aunque resulte difícil de demostrar, es casi imposible obviar la conclusión de que la salud ecológica y la cultural están vinculadas entre sí. En muchos lugares, la degradación ambiental y la cultural marchan indisolublemente unidas: la destrucción de los bosques y de las culturas forestales en Indonesia, Canadá o Brasil; el colapso ecológico y social de la cuenca del mar de Aral; la degeneración de la vida y de los paisajes de América del Norte; todo ello acaba convergiendo en grandes superficies comerciales homogéneas. El combate por proteger zonas en estado natural es por lo tanto una tarea de autoconservación económica y cultural.

Sin embargo, ese combate les parecerá ridículo e inútil a las generaciones futuras si seguimos dejando escapar carbono a la atmósfera en proporciones ni siquiera remotamente aproximadas a las actuales. Los espacios naturales y nuestra cultura del carbono no podrán continuar conviviendo en el mismo planeta, pues son básicamente incompatibles. No obstante, por desgracia parece estar todavía muy lejos el momento en que se ponga fin a esa con-tradicción. Estados Unidos, por ejemplo, invierte 2.000 millones de dólares aproximados al año en gestión de zonas naturales, pero sigue siendo, con mucho, el mayor emisor de carbono del mundo. Y el gobierno estadounidense está impulsando la financiación federal de investigaciones sobre tecnologías de energías renovables, que es lo que al fin y a la postre aportará la solución que precisa el cambio climático.<sup>66</sup>

Con todo, las naciones ricas recurren por rutina a cuantiosos desembolsos destinados a prevenir riesgos mucho más remotos que los que plantea el cambio climático. Como ejemplo citemos los presupuestos militares (ahora denominados de «defensa»), que entre sus partidas incluyen ese tipo de gastos. Los particulares hacen algo parecido cuando compran bienes inmuebles y suscriben pólizas de

seguro sanitario. Por los mismos motivos deberían asimismo suscribir alguna clase de póliza de seguro contra riesgos de cambio climático. Eso supone, en parte, métodos más avanzados de trazar los límites de espacios naturales. Uno de ellos consistiría en crear pasillos de flora y fauna que permitieran el desplazamiento entre dichos espacios naturales. Siempre que fuese posible, habría que ampliar más hacia el interior las reservas de humedales costeros, facilitando así margen para una eventual subida de los niveles marinos. Estos reajustes podrían realizarse mediante la compra directa de terrenos, o por aplicación de acuerdos de usufructo y conservación, pactos por los que los terratenientes «venden» sus derechos de actividades económicas en sus propiedades sin perder la titularidad de éstas. (Ver Capítulo 3).<sup>67</sup>

Es probable que en el interior de las zonas naturales sea necesario un enfoque mucho más de «manos a la obra» en su gestión. Las entidades de gestión territorial requerirán posiblemente inversiones más fuertes en programas de control de especies foráneas, así como intervenciones más directas a beneficio de especies amenazadas. Estas tareas exigirán partidas cada vez mayores en los presupuestos de conservación, conforme los gestores territoriales vayan enfrentándose a comedidos que requieran todo género de actuaciones difíciles e intensivas, desde la tala de arboledas de especies foráneas invasoras hasta la polinización artificial de plantas autóctonas que hayan perdido sus polinizadores de origen, tal como se hace ya en algunos espacios naturales de Hawái.<sup>68</sup>

En el mundo empresarial, el seguro contra el cambio climático podría estructurarse en forma de asociaciones entre el gobierno y la industria, tal vez según el modelo de empresa mixta *Initiative of Joint Implementation* (Iniciativa de aplicación conjunta) puesto en marcha en EEUU, programa piloto diseñado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de asociaciones de organismos gubernamentales, servicios públicos y compañías privadas de Estados Unidos con entidades equivalentes del mundo en desarrollo. Estos programas suelen incluir la utilización de energías alternativas o la reforestación, a fin de compensar las emisiones nocivas que se produzcan en cualquier zona.<sup>69</sup>

En todos estos frentes es esencial poner en práctica actuaciones que mitiguen sus impactos. Aunque lo que pueda hacerse nunca constituirá una solución que erradique el cambio climático, debido a que no es posible aracar los fenómenos de base que han convertido las actividades económicas modernas en mecanismos

emisores de carbono. Para combatir nuestra predilección por los combustibles fósiles serán necesarios amplísimos cambios tanto en la vida privada como en la pública, en especial en países industriales. Aunque los métodos de alcanzar estas reformas puedan variar con arreglo a las condiciones económicas y políticas locales, están ya claros muchos de los objetivos más generales. Entre las medidas necesarias tenemos sistemas fiscales que primen las energías renovables y el gas natural (éste es el más limpio de los combustibles fósiles) y graven el carbón y el petróleo, programas de eficiencia energética, investigación y desarrollo de energías renovables, drásticas reducciones en el uso de automóviles particulares y abandono de regímenes económicos que predispongán a la utilización de carbón y petróleo (ver Capítulo 8).

La empresa puede parecer poco menos que imposible, pero hay algunas razones que alientan la esperanza. La Convención Marco sobre Cambio Climático suscrito en Río de Janeiro en 1992 constituye un punto de apoyo decisivo para el cambio de rumbo. Según dicho convenio, las naciones industriales deberán retrotraer antes del año 2000 sus emisiones de gases de efecto invernadero a los niveles de 1990. Este es el paso preliminar de reducciones mucho más amplias más adelante, una vez se pongan a punto tecnologías y procesos más avanzados. Hasta el momento, el convenio ha logrado sólo un éxito muy limitado sobre el terreno. (Ver Capítulo 1). Aún así, puede que sea la única herramienta eficaz disponible para realizar una reforma fundamental. A pesar de que los signatarios del convenio no han aprobado aún por completo uno de sus recursos de más posibilidades: la actuación conjunta con personas y colectivos interesados en la protección de áreas naturales.<sup>70</sup>

El amplio apoyo a la conservación por parte del público en general podría traducirse en presiones directas a los gobiernos a fin de que éstos actuaran con arreglo a sus compromisos de contenido climático. Instrumentos que podrían ejercer este tipo de presiones los constituyen programas como la Campaña de Cambio Climático del Fondo Mundial por la Naturaleza. Otro de los recursos consiste en persuadir a la industria privada expuesta a los impactos directos del cambio climático. Las empresas de seguros, con pólizas por un total de cerca de 1,5 billones de dólares al año, conscientes de que los desastres relacionados con el clima podrían llevarlas a la bancarrota, se van sumando ya al debate sobre el cambio climático.<sup>71</sup>

Las empresas de productos alimentarios son también candidatas de primera mano para una coalición sobre el clima: la demanda creciente de esos productos no va a garantizarles una prosperidad perenne, dado que el cambio climático puede ocasionar perjuicios a las pesquerías y a los bancos marinos que las sostienen, u obligarles a desembolsos mucho más fuertes para seguir en producción. Las compañías forestales se hallan en parecida situación: el cambio climático puede llevar su impacto no sólo a los bosques naturales, sino asimismo a las plantaciones de árboles. Una alianza empresarial de «usuarios de espacios naturales» podría ser un aliado muy poderoso de las industrias de energías renovables, que están ya representadas en reuniones de colectivos de protección del clima como el Consejo Empresarial por la Energía Sostenible.<sup>72</sup>

Pero la convención sobre el clima está todavía en ciernes. El combate contra el cambio climático hará necesaria una profunda revisión de la ética consumista habitual de las sociedades industriales: de alguna manera, tanto individual como colectivamente habremos de redescubrir el valor de echar el freno a lo material. No obstante, no sería correcto contemplar tal conciencia de realidades climáticas como una limitación de posibilidades. Hay enormes oportunidades económicas en perspectiva: las tecnologías de energías renovables se desarrollan ahora con tal rapidez que son pocas las personas, a excepción de los expertos, que conocen el estado de la cuestión. Para determinadas aplicaciones, las energías solar y eólica han llegado ya a su mayoría de edad; otras tecnologías, como las células de combustión alimentadas por hidrógeno, los coches eléctricos y los volantes de alto rendimiento se van aproximando a su viabilidad.<sup>73</sup>

Es posible que las mejores oportunidades sean las de índole cultural. En el cambio climático podemos ver que la naturaleza no es ya un elemento que actúe con independencia de las personas: nuestra influencia en ella es profunda y a escala global. Sin embargo, los estramentos que dominan el mundo están aún pendientes de atajar las consecuencias de su propio y enorme poderío económico. La cultura consumista es, ante todo, un instrumento que anula el mundo natural al considerarlo útil solamente para simplificarlo y extraerle productos.

Más para frenar y hacer retroceder los procesos de degradación ambiental será necesario algo más que la sola conciencia de los riesgos a que nos enfrentamos. Nos hará falta asimismo una visión positiva que nos haga salir del «analfabetismo ecológico» para así

poder valorar un ecosistema sano como algo mucho más grande que una colección de posibles objetos de consumo. En definitiva, el combatir la amenaza de cambio climático es una forma de reconstrucción de las miríadas de conexiones necesarias entre la humanidad y el mundo natural.