

# Procesos medioambientales a gran escala

Una de las grandes preocupaciones del hombre de hoy es la del medio ambiente. Cada vez se es más consciente de las agresiones que la actividad humana produce sobre su entorno y el peligro que se corre de que éste acabe por volverse inhabitable. De las consecuencias adversas en el medio ambiente a nivel local se ha pasado a considerar las que afectan ya a una escala global las condiciones de la tierra. Para comprender estos problemas es necesario conocer los procesos naturales tanto endógenos como exógenos que condicionan la interacción entre la atmósfera, los océanos y la corteza terrestre y que han sido parte de la historia de nuestro planeta y de la evolución de la vida sobre él.

Agustín Udías\*

LOS procesos que afectan al medio ambiente se pueden dividir de acuerdo con la escala del área afectada. Ésta

\* Catedrático de Geofísica. Universidad Complutense. Madrid.

puede ser pequeña, media y grande. A estas escalas corresponden fenómenos locales, regionales y globales. Los últimos afectan a una gran extensión de la tierra o zonas con dimensiones superiores a 5.000 km<sup>2</sup>, mientras que los regionales afectan zonas entre 100 km<sup>2</sup> y 5.000 km<sup>2</sup> y los locales de áreas reducidas. Uno de los problemas que más interés suscita en la consideración del medio ambiente son las consecuencias de la actividad humana, o efecto antropogénico. En general, cuando se habla de los problemas que afectan el medio ambiente, se piensa, sobre todo, en el efecto nocivo de la actividad del hombre. No cabe duda que a nivel local y aun regional la actividad humana tiene una gran incidencia en el medio ambiente. A nivel global su incidencia es menor aunque empieza, con razón, a ser preocupante. Para entender bien la incidencia de la actividad humana en los procesos que afectan el medio ambiente, es necesario considerar primero la de los fenómenos naturales que tienen lugar en él.

A escala global los procesos medioambientales están condicionados por la interacción de la atmósfera, océanos y corteza terrestre. En ellos se producen procesos internos o endógenos como terremotos y erupciones volcánicas y externos o exógenos como la radiación solar y la incidencia de meteoritos. Estos procesos, que pueden afectar áreas muy importantes de la tierra son de una gran complejidad, tienen escalas de tiempo muy diferentes y su interacción resulta la mayoría de las veces muy difícil de predecir, mientras que sus resultados pueden ser devastadores.

Uno de los mayores problemas en la evaluación de estos fenómenos es que sólo conocemos con exactitud sus características para un intervalo de tiempo de observación muy pequeño, cien o a lo más doscientos años. Por ejemplo, las medidas instrumentales directas de la temperatura atmosférica se remontan al siglo XVII, pero sólo a partir del siglo XIX están lo suficientemente extendidas para representar con suficiente fiabilidad valores globales. Éste es un intervalo de tiempo muy pequeño para procesos que pueden tener escalas de cientos, miles y aun millones de años. Para resolver este problema se recurre a medidas indirectas que pueden extender la información a un pasado más remoto. Esta información no tiene, sin embargo, la misma exactitud que las medidas instrumentales directas. Cuanto más se retrocede en el tiempo, los sucesos de los que se puede tener información por métodos indirectos son cada vez de mayor tamaño y más inexactos. Por ejemplo, los terremotos de los que se tienen registros instrumentales se remontan prácticamente a principios de este siglo. Sólo desde 1960 se tiene una cobertura instrumental suficiente para detectar terremotos de magnitud 4 a nivel global. Los terremotos anteriores a este siglo se conocen a través de

relatos históricos o huellas arqueológicas. Estos relatos, a veces exagerados, sólo recogen la ocurrencia de terremotos que hayan producido daños grandes. Terremotos aún más antiguos se pueden conocer por las técnicas llamadas paleosismológicas que sólo pueden detectar la ocurrencia de terremotos muy grandes.

Desde el siglo pasado, el punto de vista predominante en las ciencias de la tierra ha sido el uniformismo. Introducido por James Hutton en 1788, el uniformismo supone que los procesos que afectan a la tierra son graduales y del mismo tipo que los que están activos actualmente. Esta teoría desbancó las teorías catastrofistas anteriores. Sin embargo, hoy en día muchas observaciones apuntan a la ocurrencia de sucesos singulares que afectan a gran escala la historia de la tierra. Después de todo nadie puede negar que la ocurrencia de grandes terremotos, erupciones volcánicas y el choque de meteoritos de gran tamaño pueden distorsionar la aparente regularidad de los procesos que afectan a nuestro planeta. Cada uno de estos sucesos puede tener una influencia grande en el medio ambiente y producir efectos de gran duración. Sucesos de estas características pueden producir un gran impacto en nuestra sociedad moderna, que a través de su desarrollo tecnológico se ha convertido paradójicamente en más vulnerable.

## Cambio climático

UNO de los problemas medioambientales que recibe más atención hoy en día es el del cambio climático. Por clima se entiende el conjunto de elementos meteorológicos que caracterizan las condiciones medias, máximas y mínimas de la atmósfera en una región durante períodos largos de tiempo. Estas condiciones dependen de la respuesta del sistema tierra-océano-atmósfera al estímulo de la radiación solar. Dentro del cambio climático se encuentra el calentamiento global de la atmósfera. Este fenómeno, detectado en las observaciones de los últimos cien años, es generalmente atribuido a la actividad humana que contribuye al efecto invernadero por la emisión de gases a la atmósfera (sobre este tema ver M. Puigcerver, *Razón y Fe*, 232, 313-325, 1995). El efecto invernadero se produce cuando parte de la radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra es emitida como radiación infrarroja y absorbida y reemitida por ciertos gases contenidos en la atmósfera, produciendo de esta forma un recalentamiento de la superficie y la atmósfera cercana a ella. Los gases de inver-

nadero más importantes son el vapor de agua, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los llamados gases cloro-fluor-carbonados (CFC). En los últimos 100 años, la concentración de algunos de estos gases se ha incrementado muy por encima de los niveles de la época preindustrial en proporciones considerables. Algunas cifras son que el dióxido de carbono ha aumentado de 280 a 356 ppmv, el metano de 0,7 a 1,7 ppmv, el óxido nitroso de 0,27 a 0,31 ppmv (ppmv: partes por millón en volumen). El vapor de agua, sin embargo, no se ve afectado por la actividad humana. Este incremento induce ciertamente un calentamiento de la atmósfera. Sin embargo, la magnitud y el tiempo de este calentamiento es menos cierto. Estos hechos están reconocidos en las memorias de 1990 y 1994 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change), establecido por las Naciones Unidas.

Una de las dificultades mayores en el problema del calentamiento global es la separación de los procesos naturales de los antropogénicos. Es un hecho bien establecido que durante el último millón de años, las temperaturas globales han oscilado en más de 8 grados entre los mínimos en las épocas glaciales y los máximos de las épocas más calientes. En las épocas recientes, anteriores a la influencia de las emisiones industriales y por lo tanto no atribuibles a la acción del hombre, hay que destacar el período caliente medieval entre los años 1000 y 1200 con temperaturas por encima de las medias actuales y el período frío entre 1550 y 1850, conocido como la pequeña glaciación. La tendencia de calentamiento observada en este siglo de aproximadamente medio grado es todavía un tema controvertido en cuanto a su origen. Podría considerarse como la continuación del ciclo normal de calentamiento después de la época fría anterior, o producido por el aumento en las emisiones de gases a partir de la era industrial.

Las estimaciones del calentamiento futuro debido estrictamente a factores antropogénicos se basan en la extrapolación de los datos conocidos desde principios de siglo aplicados a modelos de clima. La proyección de estos modelos según el IPCC predice con gran probabilidad para el año 2050, manteniendo los niveles de emisión de gases actuales, un calentamiento global de la superficie de la tierra de 0,5 a 4 grados centígrados. Las consecuencias de este calentamiento de acuerdo con los modelos son un incremento general en la precipitación y cambios en los regímenes climáticos regionales. Una consecuencia importante es la reducción de los hielos polares y la elevación del nivel global del mar entre 5 y 30 cm. Sin embargo, los resultados del modelo están sujetos a fuertes incertidumbres, entre ellas, las tasas de emisión de gases por la actividad del hombre en el futuro, su

influencia en las concentraciones atmosféricas, la respuesta del clima a estos procesos y la influencia de procesos puramente naturales. En este sentido se pronuncia un reciente estudio publicado en 1994 por el Foro de Estados Unidos sobre Modelos de Cambio Climático Global (U.S. Forum on Global Change Climate Modeling).

Dos hechos parecen ser suficientemente ciertos, el incremento de la presencia de gases invernadero en la atmósfera desde principio de siglo hasta el presente y la correlación entre este incremento y el aumento en la temperatura media global. Por esta razón es razonable proponer programas globales para conseguir la reducción de esta emisión. Con este objetivo se contemplan diversos escenarios para lograr esta reducción para el siglo que viene (entre el año 2000 y 2100). Estos escenarios se basan en cambios en la dependencia de combustibles sólidos, reducción de prácticas contaminantes y cierta disminución del consumo de energía por habitante en los países industrializados. La continuación de la práctica actual, por ejemplo, elevaría la proporción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la actual de 300 ppmv a 1.150 ppmv para el año 2100, es decir, casi cuatro veces la proporción actual. Un escenario que el IPCC define como el escenario D, con una disminución drástica de las emisiones y la dependencia de combustibles fósiles para el transporte y producción de energía podría reducir el nivel para el año 2100 a 560 ppmv. Este nivel se podría mantener constante en el futuro con un control global sobre el empleo de combustibles fósiles. Proyecciones semejantes se han hecho también para controlar la emisión de otros gases de invernadero.

La propuesta de políticas para controlar y disminuir la emisión de estos gases es una acción razonable para controlar el futuro calentamiento global. El problema principal es que toda esta política supone un cambio en los comportamientos actuales de los habitantes de los países industrializados. Desde principios de siglo en estos países la tendencia ha sido hacia una demanda de un consumo cada vez mayor de energía por habitante. Como la emisión de gases está relacionada con el consumo de energía, mientras no se disponga de fuentes de energía totalmente limpias, los países con mayor tasa de consumo son los que tienen que hacer los mayores sacrificios.

## Terremotos y erupciones volcánicas

DOS fenómenos que tienen un gran impacto en el medio ambiente, aunque su ocurrencia no es continua, son los

terremotos y las erupciones volcánicas. Los terremotos son causados por la dinámica de la litosfera terrestre. El término de litosfera es relativamente reciente y se aplica al material de un espesor de unos 100 km cuya dinámica determina la separación de continentes y océanos. La litosfera está dividida en placas en continuo movimiento. Estas placas contienen parte de corteza continental y parte de corteza oceánica. La corteza continental es constante pero la oceánica se va creando y destruyendo continuamente. Se crea en las cordilleras oceánicas y se destruye en las zonas de colisión, hundiéndose en el manto terrestre. Las placas más importantes son las de Eurasia, África, América, Pacífico, India-Australia y Antártida. El movimiento relativo de las placas litosféricas es de 1 a 6 centímetros por año. Este movimiento es la causa de los terremotos que se originan principalmente en los bordes de estas placas, aunque pueden darse también en su interior. La zona del Mediterráneo y el borde del Pacífico, tanto de América como de Asia, son ejemplos de bordes de placas y zonas de grandes terremotos.

Los volcanes están también asociados a los procesos de la litosfera. Corresponden a zonas inestables donde el material fundido del interior del manto terrestre asciende hasta la superficie y es expulsado en las erupciones. La mayoría de los volcanes están situados en los márgenes de placas y son consecuencia de los procesos que tienen lugar en ellos. Terremotos y erupciones volcánicas son, por lo tanto, procesos naturales íntimamente vinculados a la dinámica de la tierra. Esta dinámica que a primera vista parece destructora está vinculada al desarrollo de la vida. La tierra es un planeta vivo, no sólo por la presencia de vida en su superficie, sino por los procesos dinámicos de su interior. Es probable que estos procesos sean condición necesaria para la existencia y desarrollo de la vida en su superficie. No hay que olvidar que los procesos dinámicos del núcleo terrestre dan origen al campo magnético que protege la superficie de las radiaciones solares y cósmicas. Los terremotos que nos parecen fenómenos destructores son en realidad parte de una dinámica necesaria para la evolución de la vida.

La tasa de ocurrencia de terremotos aumenta inversamente con su tamaño. Mientras que en un año sólo suelen ocurrir de uno a tres terremotos de magnitud superior a 8, es decir su tamaño máximo, ocurren más de 100 de magnitud 6 y más de 20.000 con magnitud 4. Un terremoto de magnitud 6 puede causar daños considerables si su foco está cerca de una zona urbana. La energía de un terremoto puede entenderse comparando su magnitud con el tamaño equivalente de explosiones nucleares. Un terremoto de magnitud 5 es equivalente en energía a una explosión de 12 kilotones como la que destruyó la ciudad de Hiroshima. Un terremoto de magnitud mayor de 8 como



el que destruyó San Francisco en 1906 o como el de Lisboa en 1755 tiene una energía equivalente a la de 1.000 bombas atómicas de 1 megatón. Grandes terremotos son, por lo tanto, en términos de energía fenómenos de gran envergadura que pueden producir grandes fracturas de cientos de kilómetros con un enorme impacto en el medio ambiente. Este impacto se ve incrementado por las estructuras construidas por el hombre, depósitos y conducciones de petróleo o gas, presas y centrales nucleares.

En el estado actual de nuestros conocimientos, los terremotos son todavía fenómenos impredecibles. Conocemos con bastante exactitud su distribución en las zonas activas y su potencial destructor, pero no podemos predecir dónde y cuándo van a suceder. Más aún, los terremotos no son fenómenos periódicos y pueden suceder en grupos concentrando su potencial destructor en un corto período de tiempo. En este siglo en España sólo han sucedido terremotos de magnitud inferior a 5,5. Sin embargo, en el siglo pasado sucedieron por lo menos 4 terremotos destructores de magnitud por encima de 6. Las ciudades modernas con su complejo tejido de edificios, vías de comunicaciones, y conducciones de agua, gas y electricidad son particularmente vulnerables a un terremoto destructor, como se ha visto en los recientes terremotos de California y Japón. Aunque el número de víctimas se puede reducir drásticamente con una adecuada construcción, los daños materiales y el impacto sobre el medio ambiente ha aumentado considerablemente. Basta pensar en los efectos de un terremoto sobre una gran presa o una central nuclear. Pero aun sobre la misma naturaleza los terremotos grandes causan fracturas del terreno, desprendimientos de tierras, alteraciones en los cauces de los ríos y formación de embalses naturales.

Las erupciones volcánicas no son a menudo consideradas como riesgos ambientales. Sin embargo, las violentas pueden causar enormes daños, no sólo a las regiones vecinas, sino que expulsan grandes cantidades de cenizas y gases a la atmósfera con un efecto que puede extenderse sobre grandes áreas y prolongarse por mucho tiempo. Como los grandes terremotos, las violentas erupciones catastróficas son fenómenos poco frecuentes, pero no por ello de menos consecuencias. Basta recordar la explosión del volcán de Krakatoa en la que prácticamente toda esta isla del Pacífico desapareció en 1883. Se calcula que el material expulsado fue de cuatro kilómetros cúbicos y la columna de cenizas se elevó hasta 30 kilómetros. Su efecto sobre la atmósfera se prolongó por varios años. Una explosión similar en la isla de Thera en el Mediterráneo en el siglo VII a. C. se considera como el factor decisivo del final de la cultura minoica. La expulsión de cenizas y gases por las erupciones tiene una gran influencia sobre el clima. En la erupción de

Mount Helen en el estado de Washington en 1989, en sólo 10 días se emitieron cien millones de metros cúbicos de material, produciéndose una nube de 30 kilómetros de altura. En la más reciente en 1991 del volcán Pinatubo en Filipinas, la nube de gases y cenizas dio varias vueltas a toda la tierra en la alta atmósfera. Esta erupción produjo durante el año siguiente un enfriamiento global de la atmósfera de 0,3 a 0,5 grados. Los relatos históricos sobre erupciones volcánicas se remontan a un tiempo relativamente corto, por lo que no sabemos si un intenso período eruptivo de varios volcanes simultáneamente puede producir cambios climáticos notables durante períodos de tiempo largos.

## Meteoritos

UN tercer agente medioambiental, en este caso, exógeno es la caída de meteoritos. En el pasado se ha dado muy poca atención a este fenómeno, pero recientemente empieza a ser estudiado con mucho interés. Las actuales teorías sobre el origen de nuestro planeta por medio de la acreción de pequeños cuerpos celestes o planetesimales, convierte el impacto de estos cuerpos más en la regla que en la excepción. La hipótesis hoy más aceptada sobre la formación de la luna es la del impacto de un gran meteorito que determinó la separación de parte del material de la tierra para formar nuestro satélite. El choque de otro meteorito de gran tamaño debió ser la causa de la inclinación del eje de rotación de la tierra con respecto al plano de la eclíptica. A medida que se obtienen fotografías más detalladas de su superficie se observa que tanto la luna como Marte están marcados por innumerables cráteres de los impactos de meteoritos, algunos de enorme tamaño. En la tierra el número de impactos ha debido ser similar, pero los fenómenos de los movimientos tectónicos y la erosión han borrado los restos de estos cráteres con excepción de los más recientes.

De hecho la caída de meteoritos sobre la superficie de la tierra es un proceso continuo. Cada año se reciben en la tierra cerca de 10.000 toneladas de material procedente del espacio, la mayoría de muy pequeño tamaño. Solamente uno o dos cada año pueden tener entre 10 centímetros y 1 metro. Un meteorito con un radio de unos 50 metros puede caer cada 1.500 años. En caso de caer sobre tierra produciría un cráter como el que se conserva en Arizona con un radio de 1 kilómetro y unos 150 m de profundidad. Meteoritos más grandes, con el tamaño de un kilómetro y una masa de mil millones de toneladas pueden chocar contra la tierra cada millón de años y



producir un cráter de 50 kilómetros de radio. Se han identificado restos de 116 grandes cráteres de meteoritos que han caído sobre la tierra desde hace unos 600 millones de años. Uno de los mayores fue el que cayó hacia finales del período Cretáceo y al que se atribuye la desaparición de los dinosaurios y muchas otras especies de vida. Este tipo de catástrofe se estima que puede suceder cada 100 millones de años. No tenemos datos sobre las consecuencias del impacto de un meteorito de tamaño medio (unos cientos de metros) sobre la superficie de la tierra. Aunque el impacto sucediera en zona no habitada o en el mar, las consecuencias en el clima podrían ser muy notables.

## Conclusiones

LOS procesos globales que afectan a nuestro planeta y repercuten en el medio ambiente humano no se pueden medir con la escala de tiempo con que medimos la vida humana ni aun la historia del hombre. La vida sobre la tierra ha estado presente desde hace aproximadamente 3.500 millones de años. Durante este tiempo han tenido lugar, muchas catástrofes naturales, algunas de ellas han llegado a extinguir una gran proporción de las especies vivas. La evolución de la vida no es, por lo tanto, un proceso gradual, sino que ha pasado por episodios de extinciones en masas de muchas especies. Algunas de estas extinciones son hoy atribuidas a épocas de paroxismos volcánicos o al impacto de meteoritos. Muchas especies de vida han aparecido y han desaparecido. Hoy vivimos obsesionados con el impacto de los procesos generados por el hombre en el ambiente. Corremos el peligro de extrapolar la corta escala de tiempo de la historia de los hombres a procesos con una escala mucho mayor. Nuestro conocimiento actual de los procesos naturales es muy escaso y fraccionario de forma que es difícil compararlos con los producidos por el hombre. Sin embargo, esto no es excusa para continuar actividades que producen efectos negativos sobre el ambiente. Debemos ser cautos y previsores, sin aceptar fácilmente predicciones catastrofistas basadas a menudo en observaciones muy incompletas, pero sin minusvalorar el creciente impacto de la actividad humana.

Dos factores en la actividad humana tienen hoy una influencia desconocida hasta el presente. El primero es el aumento en la población mundial de aproximadamente 4.500 millones. El mero efecto multiplicativo de este factor hace que prácticas aparentemente inocuas puedan traer consecuencias muy graves. Recientemente Umberto Eco decía que si todos los chinos

empezasen a utilizar papel higiénico tendrían que talarse todos los bosques. Prescindiendo de lo pintoresco de la frase, detrás de ella se esconde una realidad preocupante. Actualmente el consumo de energía por habitante en el primer mundo es de aproximadamente 10 kilowatios, mientras en el tercero es casi cien veces menor. Si subimos a los niveles de consumo de energía de los países desarrollados los de toda la población mundial nos encontraremos pronto con toda clase de problemas para mantener su producción. Estos cálculos han sido hechos ya y los resultados son muy preocupantes. El menos tranquilizador es que los niveles de consumo de energía del primer mundo sólo son sostenibles mientras sean el patrimonio de unos pocos. Puesto de forma más cruda, sólo podemos mantener nuestro alto nivel de vida mientras éste sea injusto.

El consumo de energía lleva consigo la contaminación del ambiente. Como ya hemos dicho no hay energías totalmente limpias. El mantenimiento del ambiente pasa, por lo tanto, por la reducción en el consumo de energía. Debido al desequilibrio en el consumo de energía, es razonable que la reducción o al menos la congelación del consumo sea por parte de los países donde el consumo es mayor. Mas aún, la forma de vida del primer mundo es un ejemplo a seguir por los países menos desarrollados. Como éstos forman tres cuartas partes de una población que aumenta continuamente, pequeños incrementos pueden tener efectos muy grandes. Sólo si los países del primer mundo reducen su incremento en el consumo de energía podría llevarse a cabo una política mundial de contención de dicho consumo. Puesto que las energías no contaminantes están todavía en un futuro remoto, no hay otra alternativa. El incremento en el consumo de energía junto con el incremento en la población hacen de la situación del futuro próximo algo no contemplado hasta ahora. Las políticas de contención, sobre todo cuando tienen que ser aplicadas a los países más desarrollados, no van a ser nunca populares y van a ser difíciles de llevar a la práctica.

Aunque toda proyección hacia el futuro es muy problemática, no es previsible que la demanda de energía disminuya y tarde o temprano se tendrá que plantear el imponer su reducción. Una crítica preocupación por los efectos nocivos de la actividad humana sobre el ambiente es totalmente necesaria hoy. La vida sobre la tierra ha sobrevivido a muchas situaciones adversas y ha pasado por verdaderas catástrofes, lo que muestra su resistencia y adaptabilidad a diversas condiciones. Falta por ver si sobrevivirá a la propia actividad del hombre.