

El clima como sistema complejo adaptativo en coevolución

Walter Ritter O.* , Sergio Guzmán R.* , Norma Sánchez-Santillán** , Juan Suarez S.*** , Carmen Corona V.*** , Hipólito Muñoz N.*** , Alfredo Ramos V.*** , Rogelio Rodríguez M.*** Y Tahimi E. Pérez E.***

Resumen

Las causas de las variaciones y de los cambios climáticos, así como la posibilidad de pronosticarlas, pudiera mejorar a nivel global las cosechas y aliviar posibles incidencias de hambrunas. Pero si no podemos entender cómo funciona la atmósfera y por qué cambia en sus manifestaciones, o cuál es el papel de los frenos y balances naturales, no se pueden hacer más que predicciones imprecisas; tampoco podremos comprender cómo las actividades humanas pueden modificar y participar en el desequilibrio de la dinámica atmosférica.

Los sistemas complejos son más que el resultado de la suma de sus partes, ya que tienen sus propias leyes y su lógica interna. El continuo despliegue de la complejidad organizada del universo, su intrínseca capacidad de autoorganizarse esporádicamente, constituye una propiedad fundamental y profundamente misteriosa que tratamos de entender y explicar en este trabajo. Para esto, necesitamos sobre todo entender cómo se afectan o están interconectadas: la deriva continental, los gases atmosféricos, el clima, la evolución biológica y la biogeografía regional. La interconexión entre estas variables pudiera parecer muy sutil, pero no cabe duda, después de este análisis, de que los efectos son bastante obvios.

Abstract

The causes of climatic variability and change, and the possibility to forecast them at the global level, could improve crops as well as diminish spells of starvation. But as long as we cannot understand how the atmosphere works, and why it changes, or what role is played by its natural checks and balances, our predictions will be inaccurate, and we will be unable to understand how human activity modifies and desequilibrates atmospheric dynamics. Complex systems are more than just the result of the sum of their parts; they have their own laws and internal logic. The universe's constant display of an organized complexity, and its intrinsic capacity for sporadic self-organization, constitute a fundamental and profoundly mysterious property, which we try to understand and explain in this document. In order to do this, we attempt to establish how the continental drift, atmospheric gases, climate, biological evolution, and regional biogeography are interconnected to each other. As our analysis shows, although such interconnections could at first seem to be quite subtle, they are surely obvious.

Résumé

Les causes des variations et des changements climatiques, ainsi que la possibilité de les pronostiquer, pourrait améliorer au niveau global les récoltes et amoindrir de possibles incidences de famines. Mais si nous ne pouvons pas comprendre comment fonctionne l'atmosphère et pourquoi elle change dans ses manifestations, ou quel est le rôle de freins et de balances naturelles, on ne peut guère faire plus que des prédictions imprécises; nous ne pouvons pas non plus comprendre comment les activités humaines peuvent modifier et participer au déséquilibre de la dynamique atmosphérique.

Les systèmes complexes sont plus le résultat de la somme de ses parties, puisqu'elles ont déjà leurs propres lois et leur logique interne. Le développement continu de la complexité organisée de l'univers, sa capacité intrinsèque d'autoorganiser sporadiquement constitue une propriété fondamentale et profondément mystérieuse que nous essayons de comprendre et d'expliquer dans ce travail. Pour cela, nous avons besoin surtout de comprendre comment elles sont affectées ou sont interconnectées: la dérive des continents, les gaz atmosphériques, le climat, l'évolution biologique et la biogéographie régionale ou l'interconnexion entre ces variables pourrait paraître très subtil mais il n'y a aucun doute après cette analyse, que les effets sont assez évidents.

Palabras clave: clima, cambio climático, evolución, sistemas complejos, selección natural.

*Centro de ciencias de la atmósfera, UNAM.

**Departamento: El hombre y su ambiente, UAM-Xochimilco.

***Posgrado en ciencias ambientales, Agrobiología, UAT.

Introducción

Las causas de las variaciones y cambios climáticos que hoy tanto preocupan y que a diario se deben enfrentar han sido responsables de la caída y desaparición de grandes culturas y poderosos imperios, y actualmente actúan como responsables de la bancarrota de muchas economías. Los cambios climáticos son responsables de la reducción de capturas pesqueras en zonas históricas de producción, de la pérdida de cosechas, de propiedades, y de las mismas vidas. Sequías, deslaves, inundaciones, proliferación de plagas y enfermedades forman parte del paisaje cotidiano del cambio climático.

Según Rees (1969) siempre cabe la posibilidad de que las leyes de la física tal como las entendemos ahora sean inadecuadas. Su motivación es su interpretación para elucidar la evolución de la naturaleza, la emergencia de la complejidad del clima, de la vida y del universo actual a partir de la simplicidad primordial.

Las estructuras complejas en la naturaleza tienen como característica general exhibir su complejidad como una causa de la intrincada organización de su elevado número de componentes, los cuales están constituidos generalmente por elementos muy simples. Esa estructura es lo que es, y hace lo que hace, no tanto por lo que es, sino debido al modo en que están organizadas sus partes constituyentes, (Schneider, 1994). Dichas estructuras también parecen exhibir umbrales que cuando se los cruza, dan lugar a súbitos saltos, tanto en la complejidad como en sus propiedades, al crecer el número de vínculos entre sus partes constituyentes.

Más allá del umbral de la inestabilidad, la norma es la autoorganización; la aparición espontánea de una actividad diferenciada en el tiempo y el espacio, con formas de organización muy diversas. Lejos del equilibrio termodinámico, la energía y la materia tienen propiedades y comportamientos nuevos: nacidos como resultado de una desviación de las fluctuaciones de la materia y la energía.

Por fluctuaciones, cambios y catástrofes, se opone al universo estático un mundo abierto,

cuya actividad engendra la novedad y su evolución genera innovación, creación y destrucción, y donde los procesos, lejos del equilibrio, están articulados a los fenómenos de la no-linealidad. Además, los sistemas que son lo bastante complejos como para manifestar ciertas individualidades dentro de las totalidades, exhiben, necesariamente, una indefinición que no admite su inclusión dentro de los confines de un sistema lógico.

Los fenómenos de la naturaleza son constitutivamente complejos, y esta característica tiende a crecer al aumentar las relaciones de unos con otros, al generar nuevos niveles de realidad. Tales percepciones exigen construir conocimientos con una dinámica que permita comprender dicha complejidad, coordinados por un nuevo método que participe en ese conjunto de interacciones.

El todo está relacionado con todas sus partes, y además de depender de la cooperación ordenada y la interdependencia de sus partes, ejerce el control sobre ellas. En síntesis, en el enfoque sistémico, él todo se da de tal manera que es más que la suma de sus partes.

Todas estas características parecen cumplirse en la fase de la Tierra y en todos los fenómenos implícitos que la constituyen, como son los fenómenos climáticos y meteorológicos, y en una escala mayor en el tiempo, en los procesos coevolutivos y catastróficos de los cambios climáticos, como la evolución de la vida y la deriva continental, entre otros.

Sistemas complejos, emergencias, evolución y coevolución en el clima y la vida

Desde hace varios miles de millones de años, la materia tanto inerte como orgánica, ha evolucionado hacia estados de organización y de complejidad cada vez más elevados. La pirámide de la complejidad biológica se edificó a lo largo de las edades geológicas, lo que dio como consecuencia que los cambios climáticos, y la posibilidad de desplazarse en los peldaños de la complejidad, se dieron cuando las condiciones físicas fueron adecuadas; todo esto, en paralelo con la expansión, el enfriamiento e incremento de

la entropía del universo. Las leyes naturales, las constantes de la física, y las condiciones macroscópicas universales parecen particularmente apropiadas para que emerja la complejidad biológica a lo largo de los diferentes tiempos y eras. La Tierra, y las mismas especies que la poblamos, somos derivadas del fruto de una larga y espectacular historia de destrucciones y creaciones. La invariancia de las especies es aparente, y solo es válida en períodos cortos en el tiempo, como es nuestro lapso de vida. La aparición de nuevas especies es el resultado de adaptaciones a los cambios climáticos y a entornos cada vez más complejos. Cada especie surge de este juego de la naturaleza y del azar de las mutaciones biológicas.

Para entender el universo en que vivimos, incluyendo sus variaciones y cambios climáticos, debemos analizarlo e interpretarlo en su carácter coevolutivo histórico. Saber cómo interactúa la tierra sólida con el aire, agua, clima y vida, significa considerar a la tierra actuando como un sistema homeostático, interconectado con todos los elementos que la constituyen a través de procesos de retroalimentación autorregulada. Este sistema es algo que fundamenta su estructura y sus funciones, como un todo, mediante la interacción de sus partes. En una escala global, todo está interconectado y la deriva de los continentes, y sus emergentes e implícitas manifestaciones catastróficas han tenido una influencia mucho mayor sobre el clima y la evolución de los seres vivos, de lo que hasta hoy se había considerado.

Los sistemas biológicos como sistemas complejos parecen evolucionar al aprender a equilibrar convergencia y divergencia, al instalarse entre el orden y el caos, así como a llevar a cabo las tareas más complejas de adaptación, sin modificar su estructura fenotípica, a la vez que evolucionan en el sentido de que puedan acumular variaciones genotípicas que en lo sucesivo resultan útiles, (Parcell, *et al.* 1993). En la evolución, los sistemas complejos pueden incluir flujos convergentes, principio fundamental de la homeostasis, lo que significa estabilidad ante la perturbación, un rasgo fundamental de éstos.

La naturaleza parece tener un propósito más profundo de lo que se puede observar a simple vista. La evolución actúa como un signo de inteligencia creadora, ya que, por ejemplo, explora estructuras que van más allá de lo que se necesita para sobrevivir. Se despliega gradualmente un orden, y a medida que evoluciona el universo, emerge la organización. Para Whitehead (1929), la evolución es el avanzar creativo hacia la novedad, y para Gould (1989) es una exaltación de la desenfrenada creatividad de la vida.

Los sistemas complejos en coevolución, se adaptan como resultado de su capacidad de procesamiento de información y de su eficiencia biológica, para alcanzar un estado colectivamente beneficioso, a través del control que desarrollan las vastas redes de los elementos que los integran durante sus interacciones. Cada uno establece las condiciones para el éxito de los demás, y en un sentido global, unos y otros coexisten entre el caos y el cuasi-equilibrio, a través de la interacción de sus partes, (Schneider y Londer, 1984).

La metáfora central de la nueva visión de la ciencia está del todo conectada con la creatividad, donde la evolución es un aspecto de esta última. Recientemente se ha adoptado una perspectiva estructuralista, la cual, en busca de patrones fundamentales en la expresión de la vida, es la búsqueda de un camino para hablar del organismo como estructura unitaria, a través de la teoría de las catástrofes de Rene Thom (1972), y de las fractales de Mandelbrot (1983).

El enfoque del análisis y pensamiento sistémico en las ciencias ambientales

Un sistema complejo contempla el todo y las partes, así como las conexiones entre las partes, y cuando se estudian las partes es para poder comprender el todo. El medio ambiente es un sistema complejo, cuyo funcionamiento se trata de entender con el auxilio de las herramientas matemáticas más adecuadas.

En la comprensión del comportamiento de los sistemas complejos es importante destacar dos aspectos; el primero de ellos, se refiere a que

los elementos de un sistema determinan su existencia y funciones como un todo, mediante la interacción de sus partes; sin embargo, las propiedades de éstas últimas no necesariamente se mantienen cuando conforman el todo.

El segundo aspecto se refiere a las relaciones que se forman entre los sistemas, aspecto que opera en otra escala espacio-temporal, y que desde luego aumenta su complejidad, ya que cada sistema puede actuar de manera no predecible, en virtud de que posee propiedades emergentes, que surgen o se manifiestan mientras el sistema o los sistemas se encuentran en acción, y que se caracterizan por ser sorprendentes e impredecibles. Un ejemplo de esto sería el aparente equilibrio de la naturaleza, en donde, al perturbarse el medio ambiente, se ocasionaran dos posibles respuestas: la extinción de algunas especies y la dominancia de otras. Sin embargo, la alteración del equilibrio se encuentra en relación directa al número de vínculos que existen entre los elementos del sistema, de tal manera que, al aumentar éstos, mayor será la estabilidad, la cual, a su vez depende del tamaño, cantidad y diversidad de los subsistemas que abarque, así como del tipo y grado de conectividad que exista entre ellos.

Existen dos comportamientos dentro de los sistemas: el continuo y el discontinuo, el primero actúa de forma predecible a consecuencia de cómo se ordenan sus elementos, mientras que el segundo opera cuando se registra la ocurrencia de algún evento poco frecuente. Ambos procesos nos permiten observar que mientras más complejo es el sistema, menos fiables resultan sus muestras para predecir los posibles efectos de una perturbación en el sistema.

El análisis sistémico nos permite analizar los sistemas complejos a través del uso de las matemáticas como una herramienta. Esto no significa de ninguna manera, que el análisis de los sistemas se resuelva a través de una técnica matemática, o incluso, de un grupo de técnicas matemáticas, sino más bien, de un nuevo concepto de investigación y pensamiento, en el que se involucran técnicas y conceptos

matemáticos de manera sistemática, que conllevan a la aproximación de soluciones a problemas complejos, derivados de un razonamiento claro, de la organización lógica de los datos para crear modelos, y de la aplicación de pruebas rigurosas que permitan la exploración y validación de éstos. A partir de lo anterior, podemos identificar siete pasos que se podrían aplicar en el análisis de sistemas y en la solución de problemas ambientales: la identificación del problema, la definición, escalas de tiempo y espacio, límites de la extensión del problema, el establecimiento de jerarquías, metas y objetivos, la generación de soluciones, el modelado matemático, la evaluación del potencial curso de acción, y la implementación de resultados (Ritter, *et al.* 1998, 2000a, 2000b).

La tierra como elemento dinámico y creativo

Lo importante en la historia del planeta y en su situación actual, es la continuidad de su evolución, donde todo se mueve, fluye, cambia, interactúa y evoluciona. Desde que se formó, nuestro planeta ha estado en constante transformación, modificado sin cesar por el juego de sus fuerzas internas y el efecto de la radiación solar. Ambas actúan como actores principales; las fuerzas internas intervienen en la deriva continental y la radiación solar en los cambios climáticos. Esas dos energías, sumadas a las que se originan por la rotación de la tierra, modelan la corteza terrestre y dan lugar a un conjunto de procesos de actividades emergentes, cambios y transformaciones, de donde se desprende un ambiente que permite los intercambios físico-químicos a los que se debe la vida.

El desarrollo y la evolución de la vida estuvieron acompañados de profundos cambios en la composición atmosférica como consecuencia de correspondientes cambios en el clima terrestre. La fotosíntesis en los océanos produjo el oxígeno de la atmósfera y el desarrollo de la capa protectora de ozono en la estratosfera, así como el eventual dominio de los organismos aeróbicos. Por otra parte, y a corto plazo, las actividades volcánicas son eventos naturales

muy destructivos. Pero en realidad, para períodos largos de tiempo, los volcanes se erigen como los más grandes creadores, con capacidad de restaurar y cicatrizar las heridas creadas por ellos mismos, y a través de los cambios y movimientos de los continentes, a los que los volcanes están asociados. Establecen además, una amplia secuencia de variaciones ambientales y en la recepción de la radiación solar, que a lo largo de milenios proporcionaron a plantas y animales nuevas oportunidades de construir sus comunidades.

La dinámica de las placas terrestres es esencial para la vida de nuestro planeta y para el modelado de su fisonomía orográfica. Si no hubieran existido esos movimientos internos, si las montañas no hubieran seguido creciendo a pesar de la erosión, desde hace ya largo tiempo, los continentes no presentarían más que extensiones lacustres y una casi llanura sin relieve alguno.

Con la deriva continental, los continentes obtuvieron su distribución actual, y el número de especies creció como consecuencia de las fuertes diferencias climáticas entre el polo y el ecuador, al establecerse un mayor número de microclimas, lo que generó más oportunidades ecológicas al crearse nuevos nichos, (Lamb, 1977; Schneider, 1994; Root y Schneider, 1995).

En el transcurso de la evolución, la complejidad de la biósfera se ha incrementado, y según Lotka (1926), con su ley de la energía máxima, los organismos vivos más aptos para sobrevivir en la lucha por la vida son los que tienen la capacidad de producir la mayor cantidad de energía en un tiempo dado, la cual se invierte en el mantenimiento de su estructura, reproducción y crecimiento. Una rápida secuencia de generaciones produce nuevos genotipos en número suficiente, como para hacer frente de manera permanente a los cambios del ambiente. La selección natural hace posible la adaptación al utilizar la abundante variabilidad de la naturaleza viva.

La luminosidad solar se ha incrementado en un 25% desde la formación de la Tierra. Sin embargo, por miles de millones de años, la vida ha controlado la temperatura y la composición

química de la atmósfera. Por ejemplo, el fitoplancton incrementa su actividad biológica, al aumentar el nivel de dióxido de carbono, con lo que lo remueve al convertirlo en carbonato de calcio, el que finalmente se deposita en el fondo de los océanos, y se evita el calentamiento global atmosférico, (Vitousek, 1994).

El carbono, elemento importante para la vida, se mueve en ciclos ligados y relacionados con todo lo demás. El agua, a su vez, determina con su distribución las formas de vida de cada localidad.

La fotosíntesis emplea la energía solar para convertir el dióxido de carbono en carbohidratos y oxígeno, formando grandes volúmenes de biomasa. En esta forma, la Tierra, a lo largo de millones de años, creó los depósitos de carbón y petróleo que el hombre está liberando en unos pocos años, generando un verdadero problema de escala, en espacio y tiempo, para entender y resolver en los próximos años, (Seara, 1995; Gay y Estrada 2001). La composición geológica del suelo terrestre se encuentra en constante cambio y transformación, en donde los organismos vivos contribuyen de una manera determinante a este proceso, para lo cual basta un ejemplo: los índices de erosión de las rocas sedimentarias y metamórficas son 30 veces mayores en presencia de la vida, mientras que en las rocas basálticas, la erosión por bacterias es hasta 1000 veces mayor que en condiciones estériles. Este efecto constituye, indirectamente, un aumento en la eliminación del dióxido de carbono, con su consiguiente consecuencia climatológica; significando que la vida mantiene baja la temperatura de la tierra cuando la emisión solar aumenta. La vida se adapta pero también modifica su ambiente, preparando así nuevas páginas de su propia metamorfosis. Podemos concluir que el clima influye sobre la vida, y a su vez la vida influye sobre el clima, a través de procesos de retroalimentación.

Estabilidad climática, procesos de equilibrio, retroalimentación y selección natural

Durante más de 3,000 millones de años, el clima del planeta ha alcanzado su estado actual,

gracias a la presencia de agua en cantidad suficiente. La historia de la vida terrestre ha estado caracterizada por largos períodos de estabilidad, donde prevalecen las organizaciones dirigidas por la selección natural, la cual se manifiesta en la relación entre el tiempo de las variaciones climáticas y los tiempos de respuesta de las especies que permiten un equilibrio biológico para conservarse y alcanzar los sitios más apropiados para su sobrevivencia. Además, la selección natural y la competencia entre especies puede promover la ocupación de nuevos nichos y espacios ecológicamente vacíos, cuyo resultado final, a su vez, es la estabilidad y el equilibrio biológico; donde para perdurar es necesario, además de adecuarse un espacio, establecer un comportamiento de intercambio en el ecosistema; sin ello, la eliminación es inexorable. La asociación y el trabajo en equipo tienen una motivación económica; es decir, hacia una reducción del gasto energético; estrategia que contribuye a independizarse del entorno y a amortiguar el efecto de las fluctuaciones climáticas, con lo que la relación superficie/volumen de predadores y presas se hace óptimo. Plantas y animales han ido cambiando en el tiempo, en sincronía con el cambio climático, al evolucionar para conseguir alimentos, sobrevivir a los riesgos y criar a sus descendientes en las circunstancias impuestas por su situación geográfica y climática; respondiendo con esto a por qué consta cada ecosistema de tal cantidad de partes, y a por qué cada parte consta de tal cantidad de individuos, y a cómo comparten la energía vital del Sol entre sí.

Nuestra situación es fruto de un concurso extraordinario de circunstancias propias de un planeta distinto de los otros, situación privilegiada que se agrega a una evolución de las condiciones físicas terrestres que conduce al nacimiento de la vida; teniéndose así varios tipos de evolución: la geológica, la climática, la biológica y la biogeoquímica.

La física debe de mezclarse con la biología, la geología, la química y las ciencias humanas, para tener un relato coherente sobre la evolución del planeta y sus ocupantes, ya que lo orgánico y lo inorgánico no son entes separados,

sino que viven en una eterna comunicación de flujos y procesos de retroalimentación, al estar todo en constante movimiento, cambio y transformación, formando así una cohesión y estabilidad dinámica. Así por ejemplo, si el clima tiende a calentarse, aumenta la evaporación, y por lo tanto la nubosidad y la reflectividad de la luz solar, con lo que se reduce el calentamiento del planeta, al disminuir la entrada de energía solar. Además, con un ciclo hidrológico fortalecido por efecto del calentamiento, aparte del aumento en la evaporación, también se incrementa la precipitación y los escurrimientos, y por consiguiente, la mezcla del CO_2 y SO_2 atmosférico con la lluvia lluvia ácida que al llegar a la superficie, se combina con silicatos, tanto de calcio como de magnesio, para formar carbonatos que se depositan en las rocas sedimentarias, y se retorna como consecuencia a las condiciones iniciales. La hipótesis Gaia ha aportado estas ideas para esclarecer la llamada paradoja solar, donde la vida actúa como un proceso automático de autocontrol sobre el clima; es decir, si no fuera por la vida, que abate el contenido del dióxido de carbono atmosférico e impide que se de el calentamiento global por el efecto de invernadero, tendríamos una atmósfera predominantemente de CO_2 , con temperaturas 60°C más altas que las actuales, y posiblemente la tierra fuera inhabitable, (Lovelock y Margulis, 1973).

Fuentes de energía, biología, complejidad, regeneración y catástrofes evolutivas

Muchas han sido las fuentes de energía que contribuyeron al nacimiento del globo y a su metamorfosis. Buen número de ellas tuvieron consecuencias catastróficas: en efecto, de la uniformidad no se puede esperar que nazca nada nuevo. Sin esos aportes de energía, el planeta no habría podido evolucionar y hubiera seguido siendo una roca clavada a su órbita en el espacio cósmico.

El comportamiento actual de la materia terrestre, sigue íntimamente relacionado con sus fuentes de energía. La distancia al Sol condicionó tanto el volumen como la composición química

de la Tierra, que han sido la base de su posterior evolución, ya que sirvieron para definir las características de la atmósfera, el suelo y la hidrosfera, así como la posibilidad del desarrollo de la vida. Por su parte la actividad biológica, que aporta y retira gases de la atmósfera, justifica gran parte de los cambios ocurridos en la Tierra desde el origen de la vida hasta la actualidad.

La materia viva, en un ambiente climático en constante transformación, no pudo menos que transformarse, adaptarse y tornarse más compleja; criaturas vivientes, adaptadas a toda clase de condiciones de vida, pueblan tierras y aguas, y todas provienen de una organización que utiliza sutiles sistemas fundados en transferencias de energía, y están subordinadas a intercambios constantes de información codificada. La más pequeña amiba o la más mínima porción de hierba, constituyen mundos de complejidad y de organización que se perpetúan. Los seres vivos poseen los rasgos de la vida en lucha contra la entropía: del orden oponiéndose al desorden. Lo que nos hace ver que el universo no sólo está constituido por materia y energía sino también por información.

Tales circunstancias excepcionales han permitido la evolución continua de la vida durante un período suficientemente largo. Esta estabilidad evolutiva, ha sido súbitamente interrumpida por sucesivos fenómenos de catástrofes de diversa índole, tanto de origen terrestre como extra-terrestre (vulcanismo, inversiones de campo magnético, impactos de meteoritos, entre otros), en las que el azar y las condiciones de estrés dominantes determinaron básicamente que especies supervivientes repoblarían de nuevo el planeta. Son las condiciones globales inmediatamente anteriores al impacto catastrófico las que condicionan la evolución posterior del sistema; es decir, que cuanto más alta sea la diversidad biológica y la benevolencia del clima, justo antes de un intervalo de extinción en masa, más rápida será la regeneración del sistema.

La evolución de la biósfera ha sido un proceso tormentoso, reiteradamente interrumpido por severas disminuciones en la diversidad biológica, causadas por bruscos

cambios climáticos o episodios de anoxia oceánica, y donde su escala de eventos más o menos catastróficas es continua. La tendencia al aumento de diversidad, complejidad e independencia del medio, es compatible con una biósfera cuyo equilibrio se encuentra reiteradamente perturbado por repentinos e inesperados ingresos de energía externa, que actúan como un elemento o factor evolutivo y, por lo tanto, favoreciendo una permanente selección de atributos e innovaciones evolutivas en las poblaciones que les facilitan y permiten sobrevivir a los sucesivos periodos de crisis y cambios climáticos. Según Gould y Eldredge (1972), la versión darwinista de un proceso lento, gradual y continuo ha ido dejando paso a una interpretación caracterizada por cambios repentinos, de grandes saltos discontinuos. Es decir, que el enfoque gradualista de la evolución sólo es responsable de una pequeña parte del cambio evolutivo, y que las modificaciones más profundas en la evolución biológica se producen en determinados momentos de la historia de los grupos, de manera muy rápida (prácticamente todos los tipos de animales aparecieron hace 650 millones de años en el período de la explosión Cámbrica), dando lugar a especies estables, donde cuanto más simples son los organismos, más largo es su período de permanencia, ya que registran muy pocas variaciones posteriores. Pero también, a mayores condiciones estresantes de desarrollo, cuando se da la adaptación, pueden llegar a ser las dominantes, como fue el caso que se dio con los insectos.

La vieja idea de que los glaciares presentan un lento progreso tampoco parece ajustarse a la realidad, ya que éstos pueden desarrollarse con gran rapidez. Así, en los últimos dos millones de años, se han presentado, al menos en 20 ocasiones, grandes casquetes de hielo polares, expandiéndose mucho más allá de sus límites actuales. Estamos viviendo en un período interglaciar de equilibrio climático inestable, situado dentro de una de las principales "edades de hielo" de la Tierra, conocida como la glaciación cuaternaria, en la cual se presenta la posibilidad de que una pequeña variación de energía solar en la

superficie terrestre, pueda bastar para que vuelvan los hielos glaciares o para que se fundan los existentes. Milankovitch (1920) señala que se necesita tan solo una reducción de la insolación durante algunos veranos sucesivos en el hemisferio norte, que los haga más fríos de lo normal, y no una sucesión de rigurosos inviernos, como disparador de una glaciación.

La naturaleza parece avanzar mediante saltos repentinos y transformaciones profundas, y no tan sólo a través de pequeñas adaptaciones. Esta trascendencia creativa, que con el tiempo lleva a un ordenado despliegue de complejidad, empieza a verse como una propiedad fundamental de la vida, y como una característica básica del universo. En todas partes se pone el acento en el inmenso derroche de la naturaleza, que hace, a fin de cuentas, que los acontecimientos menos frecuentes acaben teniendo las más importantes consecuencias. Todo esto, según Prigogine (1989), es de que: "la historia de la vida, al ir formando sistemas dinámicos, cada vez más alejados del equilibrio, puede leerse como la historia de la multiplicación de la sensibilidad, como la incorporación por el organismo viviente activo de débiles interacciones que se convierten en otras tantas informaciones que tejen sus relaciones con el mundo". Es decir, que el orden por fluctuaciones opone al universo estático un mundo abierto, cuya actividad engendra la novedad, cuya evolución es innovación, creación y destrucción.

Deriva continental y glaciaciones

La Tierra es un cuerpo dinámico cuya superficie cambia constantemente. Choques entre continentes provocan el nacimiento de montañas (las lluvias con su erosión se encargan de desaparecerlas). El formidable motor de esa mecánica se encuentra en las corrientes de convección del manto terrestre. Los continentes flotan y se trasladan por efecto de la rotación de la Tierra. Claramente en el origen de las edades de hielo, la deriva de los continentes a través de los polos fue un factor decisivo, y ese movimiento determinó la apertura de algunos mares y el cierre de otros. Los hielos que se forman en las

regiones polares flotan; es decir, no se acumulan en el fondo marino, porque si éste fuera el caso, los hielos terminarían llenando los océanos y no habría más corrientes marinas, por lo que toda la máquina termodinámica del clima quedaría bloqueada.

En el ciclo de Wilson de la deriva continental, se habla de un ciclo recurrente de 500 millones de años en su dispersión y posterior reunificación de los continentes. Hace 200 millones de años el supercontinente de Pangea coincidió con la presencia de una glaciación y con la mayor extinción de especies en la historia de la vida terrestre. Podemos decir entonces que la presencia de los supercontinentes, debido a su clima continental, favorece la presencia de las glaciaciones y, como provincia biogeográfica única, cuentan, por lo tanto, con un menor número de nichos, y por lo tanto con una menor diversidad de especies. Es claramente observable la coincidencia de las grandes extinciones de organismos con la transformación de los supercontinentes.

Coevolución planetaria, numero de especies y extinciones en masa

Para realizar un análisis de coevolución terrestre, se debe conocer la situación planetaria en cuanto a la distribución de masas continentales, clima, circulación oceánica, y distribución geográfica de plantas y animales, como agentes causales normales que en un momento dado puedan encender la mecha de una situación explosiva. La estructura de la Tierra a cambiado a lo largo del tiempo y, aunque las causas determinantes de tales cambios pudieran ser comparables, las consecuencias definitivamente nunca lo serían, donde con base en el paradigma neodarwinista, la extinción debe considerarse como una parte indispensable de la evolución; de modo que siempre habrá una relación causal entre la distribución de los continentes, el ambiente climático y la extinción de las especies.

Los cambios climáticos son necesarios para que haya saltos en la evolución. Pero cuando ocurren éstos, son las especies llamadas

especialistas, que corresponden a las de mayor complejidad, las que resultan más afectadas, junto con las poblaciones con tasas de renovación lentas. En cambio, los generalistas ecológicos son los principales supervivientes. De alguna manera, adaptación y selección natural han funcionado a un nivel distinto al de las extinciones en masa, ya que aunque son procesos que se encuentran estrechamente vinculados, las escalas de espacio y tiempo en las que operan son distintas. Sin embargo, las extinciones han sido importantes para el buen funcionamiento y composición a largo plazo de la biósfera.

El número de especies ha crecido conforme el planeta se ha enfriado, y la separación de los continentes ha aumentado, llegándose en la actualidad a su mayor valor observado. La imagen que arroja la historia de la vida sobre el planeta aparece en una escala progresiva con los tipos biológicos. Todo esto es consecuencia de una mayor variedad de climas en las diferentes zonas biogeográficas, que las que existieron en las primeras eras geológicas. La enseñanza inmediata de esta síntesis, es de que el ambiente y los organismos vivos están ligados entre sí, y son inseparables de los procesos planetarios.

La energía solar, variabilidad y crisis climáticas

La energía solar y sus fluctuaciones son la clave para la comprensión del clima y el estado del tiempo. Los cambios climáticos, a su vez dependen de pequeñas modificaciones en el funcionamiento normal de la máquina atmosférica. Se sabe también que las crisis climáticas, están directamente relacionadas con la actividad solar, aunque no necesariamente tengamos que esperar que un año de gran actividad solar sea, por ejemplo, un año seco en todo el planeta, ya que debido a los fenómenos de compensación y de progresión de estas crisis, sólo se puede afirmar que en todo el mundo, la frecuencia de las crisis climáticas es equivalente a la de la actividad solar.

Milankovitch (1920) sugiere que las edades de hielo, pudieron haber sido causadas por variaciones en la órbita terrestre, proceso que

se presenta a través de períodos de miles de años, con lo que se dan fluctuaciones en las cantidades de ingreso de la energía solar a la Tierra. Los cambios en la circulación de los océanos y de su temperatura (provocados por posibles modificaciones en la distribución y morfología de los continentes) inducen a su vez una redistribución del calor atmosférico, y por lo tanto, del clima y del estado del tiempo.

El clima mundial depende de la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol, mientras que su estabilidad se forma por el precario equilibrio entre el filtro atmosférico, la capacidad reflectiva terrestre y el potencial de absorción de la atmósfera y la superficie. La cantidad de energía solar que llega a un punto dado depende del clima del lugar, de la densidad de las nubes, y de la distribución del vapor de agua en ese lugar. Pero a su vez, la distribución, tanto de las nubes como del vapor de agua, dependen de la radiación solar.

Un incremento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera dificulta que la radiación solar llegue a la superficie terrestre, al mismo tiempo que evita que parte del calor re-radiado por la Tierra se pierda en el espacio. Cuanto más limpia esté la atmósfera, mayor será el gradiente de temperatura, y por tanto del gradiente de presión, entre las regiones polares y ecuatoriales. Y a la inversa, cuanto más sucia se encuentre, menor será la intensidad de la circulación atmosférica.

Una reducción en el flujo de la energía solar sobre la superficie terrestre la enfría y disminuyen los gradientes térmicos y de presión entre los polos y el ecuador, con migración de los frentes polares hacia las regiones ecuatoriales, y se provoca una compresión de las celdas de circulación de Ferrel y Haddley. Además, se intensifica la circulación atmosférica, lo que a su vez genera un incremento de la precipitación en altas latitudes.

Un incremento en la recepción de la radiación solar que provoque que se derritan totalmente los casquetes polares, haría que los gradientes atmosféricos de temperatura y de presión disminuyan, hasta quedar reducidos a la mínima expresión, y el sistema de circulación de

las masas de aire se amortiguaría con gran rapidez. Es de esperarse también, que cambios en área y extensión de las capas de hielo polar puedan forzar un cambio climático.

Variaciones en la emisión radiactiva del sol, son consideradas como mecanismos de forzamiento externo, y si éstas están relacionadas a la geometría espacial Tierra-Sol, o con variaciones en la actividad solar, se dice que son de origen determinístico. Los procesos internos dentro del sistema climático terrestre, que nos conducen a un cambio climático, son definidos como mecanismos estocásticos. Las erupciones volcánicas, por ejemplo, tienen un comportamiento claramente probabilístico en el tiempo.

Cuando el suelo oceánico tiene razones de separación mayor y vulcanismo activo, el nivel del mar sube, se incrementa el CO₂ y el clima es cálido y más húmedo. Sin embargo cuando se trata de grandes erupciones volcánicas, sucede lo contrario; es decir, se presentan avances en los glaciales debidos al efecto de escudo solar de las partículas, al ser inyectadas a una mayor altura. Los períodos glaciales también han sido relacionados con las inversiones periódicas de polaridad del magnetismo terrestre, ya que, al aumentar el grado de ionización de la atmósfera y quedar expuesta a un mayor nivel de radiación cósmica, aumenta la formación de nubes cirros, que son altamente reflectivas. Con todo esto, nos encontramos ante el hecho real de las “glaciaciones instantáneas”, es decir, de que éstas, puedan llegar a desarrollarse en períodos muy cortos de tiempo.

En el entorno en que vivimos, observamos también, tanto regularidades como fluctuaciones inesperadas de gran escala, lo cual nos coloca fuera de lo esperado de las condiciones normales de un Sol abastecedor estable y confiable de energía y responsable único, con sus fluctuaciones, de los cambios climáticos en la Tierra. Encontramos que el clima está sometido a grandes oscilaciones en intervalos cortos de tiempo, en comparación con los tiempos característicos que determinan la evolución del Sol. Ello nos hace observar de que

no tan solo vivimos en un mundo de regularidades, sino también en un mundo de inestabilidades y fluctuaciones, responsables de la enorme variedad de formas y estructuras que observamos en la naturaleza.

Las “manchas solares” influyen al aumentar considerablemente el flujo energético del Sol, con periodicidades de 11 años principalmente, y otras de diversa duración. En cambio, en los mínimos se disminuye el flujo, como el “mínimo de Maunder”, que originó una pequeña glaciación y el deterioro del clima mundial entre los años de 1650 y 1700. Estas pequeñas glaciaciones se han venido produciendo con periodicidades aproximadas de 2,000 años, aunque existe la posibilidad de que puedan darse situaciones menos drásticas en períodos más cortos de tiempo, ya que estamos viviendo en un período de equilibrio inestable, en donde una pequeña variación en la energía solar recibida, podría bastar para fundir o hacer crecer los hielos polares, (Mendoza, *et al.* 1997; Gay y Estrada, 2001).

El vórtice circumpolar y la variabilidad climática

Los vórtices circumpolares son parte principal del clima que experimentamos en la Tierra. Las fluctuaciones en el nivel de energía solar y la dinámica de sus giros circumpolares, ejercen una gran influencia sobre los fenómenos meteorológicos y la distribución de plantas y animales, notándose que en ciertas áreas bastan pequeños cambios en éstos vórtices para provocar sequías y períodos de nefastas consecuencias.

El funcionamiento de la atmósfera también está interconectado con todo y consigo mismo, y la característica clave a largo plazo (décadas o siglos) de la evolución del clima son las variaciones del vórtice circumpolar. El vórtice circumpolar ha sido una característica de la Tierra durante la mayor parte de su existencia, y aunque pareciera ser poco influenciado por la distribución de continentes y océanos, se nota que con sutiles cambios de posición se dilatan o comprimen ciertas zonas climáticas, incluyendo

el cinturón monzónico, con lo que se alejan o acercan del polo, respectivamente.

Cuando la Tierra tiende a calentarse y la circulación circumpolar se intensifica, la corriente de chorro también presenta la misma situación con un mínimo de meandros, con lo que las zonas climáticas del Sur pueden extenderse hacia el Norte, permitiendo que los monzones lleguen con cierta regularidad a sus lugares de origen. Las condiciones climáticas tienden a ser más moderadas y las regiones de latitudes medias no presentan situaciones extremas, por lo que la temperatura y las lluvias son más previsibles, con gran beneficio para la agricultura.

Hace unos tres millones de años, comenzó una época glacial que ha variado en intensidad varias veces, y que todavía no nos ha abandonado. Estamos viviendo una era interglacial de 10,000 años, climáticamente muy estable, y el calentamiento observado es tan solo una desviación temporal de las condiciones normales más frías con presencia de sequías en las altiplanicies norteamericanas y en el Sahel, así como, épocas de cultivo más cortas en latitudes templadas.

Para John Gribbin (1982), los tiempos climáticos tan variables que se presentan tienen una relación muy estrecha con la dilatación y debilitamiento que se observa en este vórtice circumpolar, al empujar el monzón hacia el sur y permitir que los anticiclones de bloqueo retornen con una mayor frecuencia. Ello hace que los sistemas de baja presión cargados de humedad se muevan a lo largo de los extremos de los meandros, norte o sur de sus trayectorias principales.

La desaparición de las lluvias del Sahel, puede también explicarse por la dinámica de dilatación del vórtice circumpolar, al comprimir y empujar las zonas climáticas hacia el ecuador e impedir o limitar la penetración del monzón hacia el Norte; situación clásica de debilitamiento del vórtice circumpolar, y por lo tanto, de una situación de catástrofe climática. Ambas situaciones son derivadas de una circulación general de la atmósfera influenciada a su vez por la distribución de los continentes.

Lamb (1977), por otra parte, también aporta pruebas de una circulación global atmosférica debilitada en las últimas décadas. Si el vórtice circumpolar se debilita, la Tierra se enfría y se establecen los anticiclones de bloqueo. No sabemos exactamente en qué años se producirán sistemas de bloqueo; pero sí podemos ver que la mayor frecuencia de sequías y de otros extremos climáticos observados en la actualidad, pudieran señalar que se está retornando a las condiciones que dominaron el globo hace varios milenios.

Vivimos en un período interglacial, pero los datos e información recopilada de que se dispone como es: la actividad volcánica, manchas solares, magnetismo y ritmos de Milankovitch (1920), señalan que estamos retornando a las condiciones normales de una era glacial tras un posible calentamiento temporal a corto plazo, (Gay y Estrada, 2001).

Los intercambios de CO₂ en el Hemisferio Sur son solamente de un tercio de los que se observan en el Hemisferio Norte. La posibilidad de que el tercer mundo se vea beneficiado de un aumento del dióxido de carbono, mientras que el mundo desarrollado sufrirá es algo que todavía no se puede probar, pero con esto se está introduciendo una nueva dimensión en la política global y en la interrelación humana. Lo que sí se sabe es que ello dependerá, en gran medida, de que el efecto por el calentamiento en la atmósfera debido al aumento del dióxido de carbono (efecto invernadero) pueda llegar a tener mayor peso en el clima (Adem y Garduño, 1984), así como de la posibilidad de que cualquier tendencia al enfriamiento pueda ser compensada por la influencia de las actividades humanas sobre el clima. Pero la amenaza seguiría siendo la continuación del retorno hacia las condiciones más frías e irregulares de la pequeña glaciación.

La catástrofe climática del fenómeno de El Niño

La corriente del Perú es normalmente una corriente fría rica en nutrientes y fitoplancton, por lo que atrae a los peces. Sin embargo, con una periodicidad de cuatro a cinco años, aumenta su temperatura, y entonces recibe el nombre de "El

Niño". Estas corrientes y sus vientos asociados reflejan las interacciones océano-atmósfera, cuyo componente más importante es el anticiclón del Pacífico Sur. Periódicamente, el anticiclón deriva hacia el oeste-sudoeste del Pacífico, invirtiendo los regímenes de presiones, y provocando los acontecimientos ENSO (El Niño Southern Oscillation).

El resultado es una variación del nivel del mar, y una inversión del sentido de los alisios y de las corrientes superficiales, impidiendo la surgencia de las aguas frías profundas. Toda la circulación oceánica y atmosférica se modifica: llueve donde se espera que el sol deba brillar, y la sequía se instala donde debería llover.

Este fenómeno puede durar desde algunos meses hasta uno o dos años, y tiene consecuencias catastróficas para la industria de la pesca. En tierra firme, estos cambios se acompañan de tempestades y lluvias torrenciales, devastando los cultivos, provocando deslizamientos de terreno, e inundando las regiones litorales. Podemos decir que los mecanismos de estas anomalías son conocidos, lo que desconocemos es por qué el anticiclón se dirige en algunos años hacia el Oeste. Sin embargo, existe la posibilidad, aún por verificar, de que ello esté asociado a la conocida deriva hacia el oeste del campo magnético de la Tierra, ya que las líneas de intensidad del campo magnético muestran una gran semejanza con las isolíneas del campo de presión atmosférica.

Obviamente, no conocemos aún todas las respuestas y ni siquiera todas las preguntas importantes que podamos hacer. El universo no parece otra cosa que probabilidad, y la probabilidad parece estar en la naturaleza física de las cosas. Heisenberg (1971), nos enseñó que no todas las proposiciones científicas son falsas o verdaderas, sino que la mayor parte de los enunciados, si no es que todos, son indeterminados, inciertos, grises y borrosos. Mientras para muchos, es la habilidad lógica y matemática la que nos llega a poner en un primer sitio en la jerarquía de la ciencia, y cuantas más matemáticas aplique un autor en un problema, menos lo entenderá su auditorio y más lo respetará. Pero debemos entender que la lógica y

las matemáticas no son siempre el problema a enfrentar, pudiendo recordar lo que Einstein (1993), frecuentemente solía decir; "En la medida en que las leyes de las matemáticas se refieren a la realidad, no son ciertas. Y en la medida en que son ciertas, no se refieren a la realidad." Lorenz (1963), destacada figura de la meteorología y las matemáticas, a su vez solía decir: "A medida de que aprendo meteorología, desaprendo matemáticas". Pero al final de todo esto, la más grande maravilla de la naturaleza está en que puede ser comprendida aún para nuestros limitados sentidos.

Bibliografía

- Adem, J. y R. Garduño, 1984. Sensitivity studies on the climatic effect of an increase of atmospheric CO₂. *Geofis. Int.*, 17-35.
- Broecker, W. 1990. How to build a habitable planet. Palisades: Lamont-Doherty Geological Observatory Press.
- Einstein, A., 1993. La evolución de la física. Biblioteca Científica Salvat. 241 pp.
- Gay, C. y Estrada M., 2001. Climate change: sustainable development, equity and market mechanisms. *World Resources Review*, Vol. 13, No. 3.
- Gould, S. J., 1989. *Wonderful life*. Norton, New York.
- Gould S. J. y Eldredge N., 1972. Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. En Schopf: 82-115.
- Gribbin, J., 1982. *Future weather*. Penguin Books. 271 pp.
- Heisenberg, W., 1971. *Physics and beyond*. Harper & Row, New York.
- Lamb, H., 1977. *Climate: Present, past and future*, Methuen and Co., Londres.
- Lorenz, E. N., 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sciences*, 20: 130-141.
- Lovelock, J. E., y L. Margulis, 1973. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus*: 26:2.
- Mandelbrot, B., 1983. *The fractal geometry of nature*. Freeman, New York.
- Mendoza, B., R., Garduño, y J. Adem. 1997. The impact of

solar irradiance on the Maunder minimum climate. *J.Geomag.Geolectr.*,49: 957-964.

Milankovitch, M., 1920. *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*, Gauthier-Villars et Cie, Editeurs, Paris.

Parcell, D. A., J. Taulien y S. Lindquist, 1993. The role of heat-shock proteins in thermotolerance. *Philosophical transactions of the royal society. Serie B, London.* 39: 279-286.

Prigogine, I., 1989. The philosophy of instability. *Futures*, 21, 4: 396-460.

Rees, M., 1969. The collapse of the universe: An eschatological study. *The Observatory*, 89. 193 pp.

Ritter, O. W., P. Mosiño A., E. Buendía C., 1998. Dynamic rain model for lineal stochastic environments. *Quarterly Journal of Meteorology. MAUSAM (INDIA).* Vol. 49. No. 1: 127-134.

Ritter, O. W., P. Mosiño A. y R. Patiño M., 2000a. Predicción y naturaleza. *Revista Ciencia y Desarrollo.* Julio / Agosto del 2000. Volumen xxvi. No. 153.

Ritter, O. W., P. Mosiño A. y R. Klimek, 2000b. Una visión estadística no-lineal de El Niño; simulación y posible pronóstico. *Revista Ciencia y Mar.* Enero/abril del 2000. Volumen IV. No 10: 29-37.

Root, T. L. y S. H. Schneider, 1995. Ecology and climate: Research strategies and implications. *Science* 269: 334-41.

Seara, V.M., 1995. *La hora decisiva (análisis de la crisis global)*. Editorial Porrúa, México, 417 pp.

Schneider, S. H., y Londer, 1984. *The coevolution of climate and life*. Sierra Club Books, San Francisco.

Schneider, S. H., 1994. Detecting climate change signals: Are there any "fingerprints". *Science*, 263: 341-347.

Thom, R., 1972. *Stabilité structurelle et morphogenese*. Ediscience, París.

Vitousek, P., 1994. Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology* 75: 1861-76.

Whitehead, A. N., 1929. *Process and reality*. MacMillan, New York.

Recibido: 20 de Febrero del 2002

Aceptado: 9 de Abril del 2002