

# La evolución biológica

*como sistema autoorganizado*

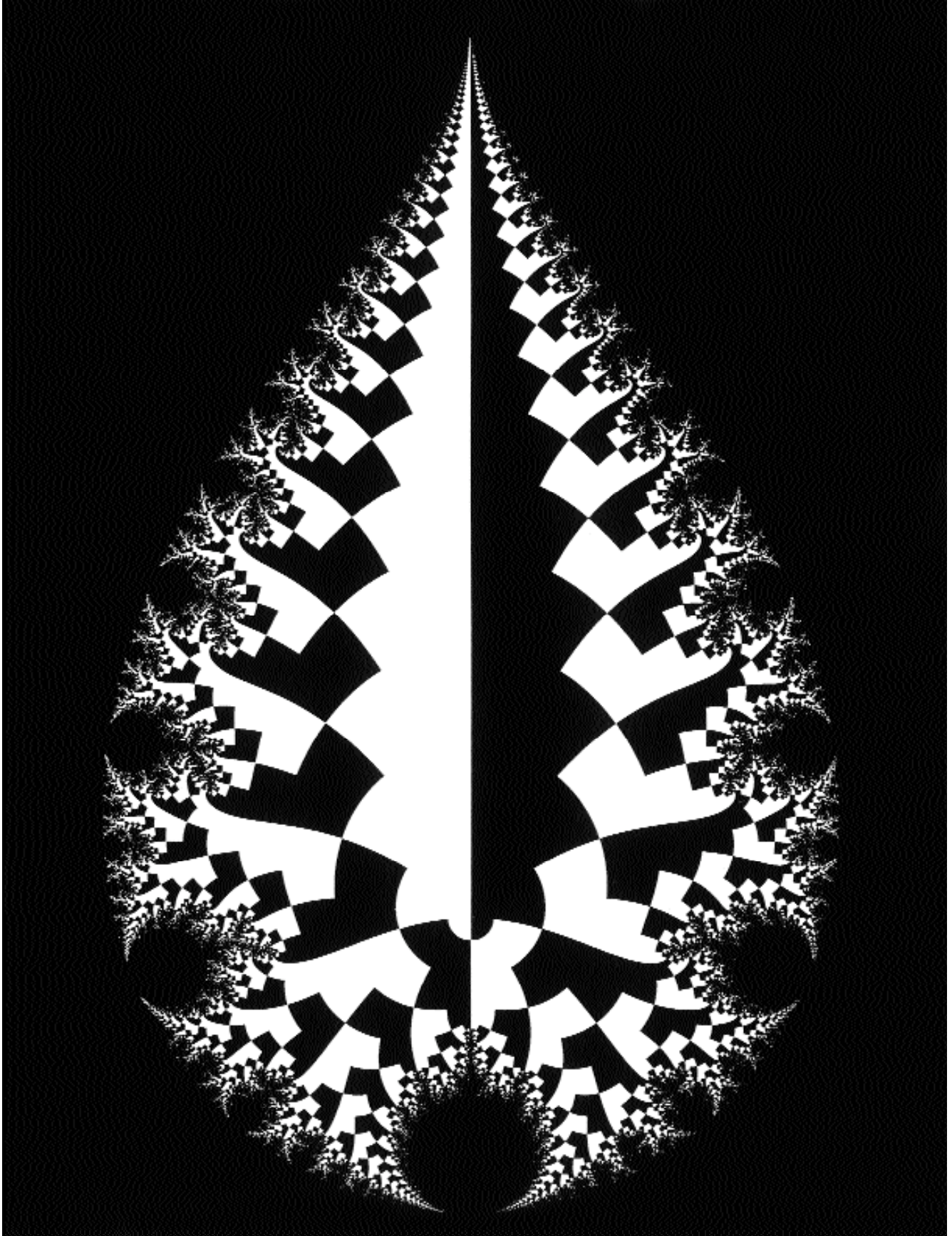
*dinámicas no lineales*

*y sistemas biológicos*

**E**n 1887, para conmemorar su cumpleaños 60, el rey Óscar II de Suecia estableció un premio de 2 500 coronas para quien demostrara que el sistema solar es estable. El matemático francés H. Poincaré señaló que un sistema que considera el movimiento de dos cuerpos es fácilmente predecible, pero conforme aumenta el número de cuerpos también lo hace la dificultad en la predicción, por tanto, un cuerpo influido por nueve planetas era virtualmente imposible de predecir. Para contestar la pregunta, Poincaré diseñó nuevas técnicas en matemáticas como el espacio de fases, que es la representación gráfica de la solución de una ecuación diferencial —un espacio matemático conformado por las variables que describen la dinámica del proceso.

En el mismo año Stephen A. Forbes consideró que, partiendo del impredecible resultado de la competencia entre las especies que ocupan un pequeño volumen de agua, se llega al orden imperante en la escala de todo un lago, sosteniendo que la selección natural es la fuerza que mantiene ese orden sin poder explicar lo que conduce al

Rodrigo Méndez Alonzo





caos aparente en la microescala. En esto seguía la idea de Darwin, para quien la principal causa que produce la multitud de formas de vida es la fuerza de la selección natural, motor de las transformaciones de las especies en un mundo cambiante.

En las primeras décadas del siglo xx, el matemático Vito Volterra utilizó la técnica elaborada por Poincaré para explicar el planteamiento realizado por su yerno sobre las fluctuaciones en los volúmenes de pesca durante los años de la Primera Guerra Mundial, y en 1926, simultáneamente con Alfred Lotka, Volterra inventó las ecuaciones sobre competencia, y en una carta a la revista *Nature* se observa el uso del espacio de fases para contestar una pregunta ecológica. Desde entonces, la utilización de las isoclinas derivadas de la cuenca de atracción del espacio de fases y de las ecuaciones de Volterrase han aplicado profusamente en ecología de poblaciones.

La trayectoria de un péndulo puede representarse como un sistema disipativo —aquel que no conserva su propia energía, también llamado hamiltoniano— donde se grafica la posición contra el impulso —que es el producto de la velocidad por la masa— en el espacio de fases. Debido a la pérdida de energía por fricción el péndulo tenderá a detenerse en un punto, independientemente de la energía con la que inicie su trayectoria; a ese punto se le conoce como atractor puntual. Si imaginamos el péndulo libre de fricción, su trayectoria será infinita, y en el espacio de fases quedará representada como un ciclo. A este tipo de atractor se le conoce como atractor de ciclo límite. A la región en el espacio de fases cuya tendencia sea llegar al atractor se le conoce como cuenca de atracción. En 1967 Edward Lorenz, al estudiar el flujo de gases en la atmósfera, encontró un atractor con estructura fractal, por lo cual nunca se repite la misma trayectoria. A este atractor se le llamó atractor extraño. Los fenómenos caóticos deterministas por lo regular presentan este tipo de atractores.

En 1974 Robert M. May señaló que incluso ecuaciones más sencillas que las de Lotka-Volterra tienen un comportamiento muy complejo. Para probarlo, iteró la ecuación logística desarrollada en el siglo xix por Pierre-August Verholst y percibió, al graficar la tasa de crecimen-

to  $r$  contra la población  $p$ , que a partir de una  $r$  de aproximadamente 3.57 y menor que 4 se llegaba a un comportamiento de bifurcación que progresivamente conducía a una región estrecha donde la cantidad de posibles resultados era infinita, pero bajo determinadas cantidades de  $r$  se llegaba a ventanas donde era posible predecir el resultado. Esto es, May descubrió un caos determinista, también llamado complejidad. Con  $r$  menor que 4 se alcanza un estado donde es imposible predecir en cualquier escala, esto es, un comportamiento estocástico.

Caos proviene del griego, equivale a abismo o desorden. En realidad la mejor definición de caos determinista es una alta sensibilidad a las condiciones iniciales en un fenómeno donde se puede demostrar que hay acotamiento; esto es, uno con un atractor donde, por la imposibilidad de conocer todas las condiciones iniciales, se llega a una divergencia en la trayectoria, que no sea susceptible de predicción a largo plazo (un fenómeno es caótico si el exponente de Lyapunov tiene valores positivos). La diferencia entre éstos y los fenómenos estocásticos es que los caóticos son deterministas y susceptibles de predicción a corto plazo, mientras que los segundos son imposibles de predecir en cualquier tiempo, por tanto su atractor será de la misma dimensión que el espacio de fases.

La aportación de May impactó las ciencias físicas, donde los comportamientos caóticos en ecuaciones de ecología de poblaciones se conjugaron con los problemas de matemáticos como Mandelbrot y Ruelle, y de químicos como Prygogine, para impulsar una revolución científica que derribó el determinismo, conformando la ciencia del caos o teoría del caos. Posteriormente se descubrió que gran cantidad de fenómenos y estructuras de la naturaleza tienen comportamiento caótico. Sin embargo, en ecología se consideraba que los sistemas no lineales y los comportamientos caóticos no eran más que una posibilidad teórica, o incluso un comportamiento matemático sin aplicación real en sistemas ecológicos. Pero, tras el descubrimiento de May, Michael Gilpin demostró que las ecuaciones de Lotka y Volterratenían en el espacio de fases un atractor fractal, con lo que se podía concluir que poseían, al igual que la ecuación logística, un comportamiento caótico. Los atractores fractales en el espacio de fases fueron encontrados teóricamente y como explosiones demográficas en plagas de *Thrips imaginis* y en las fluctuaciones demográficas del linco. También se pensaba que los comportamientos caóticos sólo podían producirse a partir de perturbación humana, pues al reducirse las poblaciones

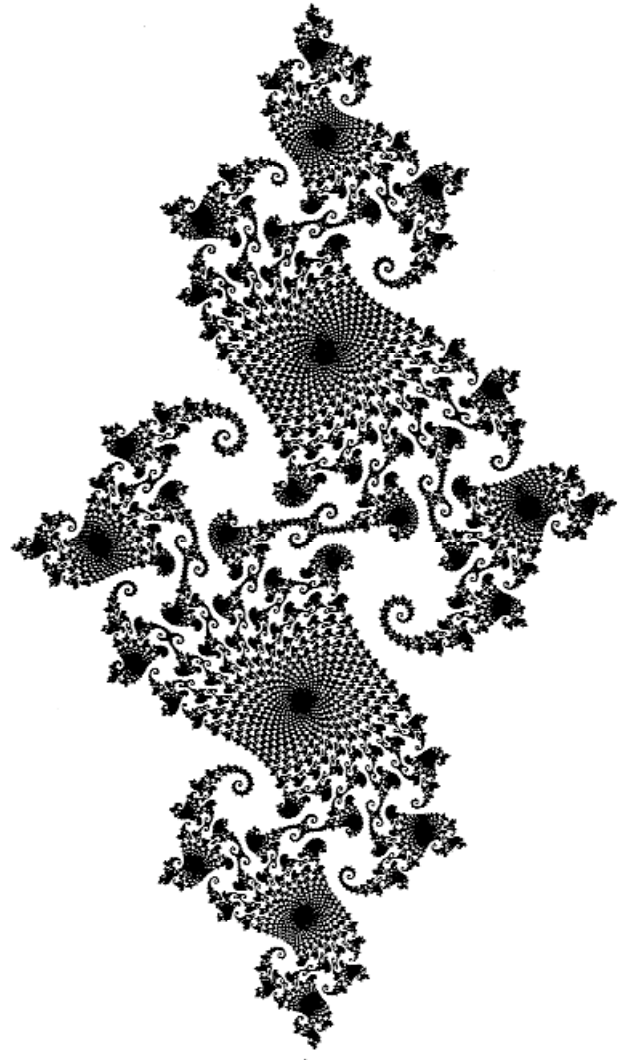
hasta densidades cercanas a la extinción sólo podían tener crecimiento, lo cual llevaría a una continua retroalimentación positiva que podría implicar comportamientos caóticos —o sea la imposibilidad de predecir el resultado del crecimiento poblacional—, pero sólo bajo sistemas modificados, lo que querría decir que los sistemas naturales serían anticaóticos.

En la actualidad, se considera que el caos se presenta en muchos fenómenos ecológicos, como en el ensamblaje de las comunidades. Se ha observado en una comunidad de fitoplancton que al presentarse oscilaciones caóticas, el número de especies supera lo esperado por la teoría de la exclusión competitiva, al menos teóricamente. También se encontró que es posible sostener hasta nueve especies por tres recursos limitantes, con lo que puede explicarse la llamada paradoja del fitoplancton; además se demostró que el resultado de dicha competencia es impredecible por contener en el espacio de fases un atractor fractal.

#### **Autosimilitud en los fenómenos biológicos**

Una consecuencia de los sistemas no lineales, derivada de las ecuaciones en potencia, es la autosimilitud a diferentes escalas. A fines del siglo XIX fueron descubiertas ciertas figuras que contradecían la geometría euclidiana, que no correspondían ni a una línea, un punto, una superficie o un volumen, sino que parecían ser intermedios a estas dimensiones. Poincaré las llamó monstruosidades y para tratar de explicarlas inventó la rama de las matemáticas conocida como topología, donde el punto tiene dimensión igual a cero, la línea a uno, la superficie a dos [...] pero hay figuras cuya dimensión es intermedia, como la dimensión de Hausdorff. Las monstruosidades fueron olvidadas hasta 1975, cuando Benoit Mandelbrot las denominó fractales; a partir de ese momento la geometría fractal empezó a considerarse casi ubicua en los fenómenos naturales.

La palabra fractal proviene del latín *fractus* que significa irregular. Neologismo inventado por Benoit Mandelbrot, quien, al estudiar las diversas mediciones de la costa de la Gran Bretaña, demostró que la longitud podía llegar hasta un infinito teórico. Esto se debe a que la longitud de la costa depende de la unidad de medición, ya que mientras más fina sea más larga será la costa, pues se requerirán más pasos para medir el objeto, y por la forma de la costa se incluirán cada vez más irregularidades, lo que



coincide con la forma de los fractales, rugosa y autosimilar. Estas figuras ocupan un intermedio entre las euclidianas y las geoméricamente caóticas, que son rugosas pero no presentan ningún patrón de regularidad. Su dimensión topológica es fraccionaria, y en sistemas biológicos tienden a ocupar prácticamente toda la dimensión anterior con el mínimo de llenado en la siguiente, lo cual es claro cuando se piensa en el sistema circulatorio de mamíferos, pues puede irrigar todo el cuerpo —tendencia a una superficie infinita— ocupando 5% del volumen total.

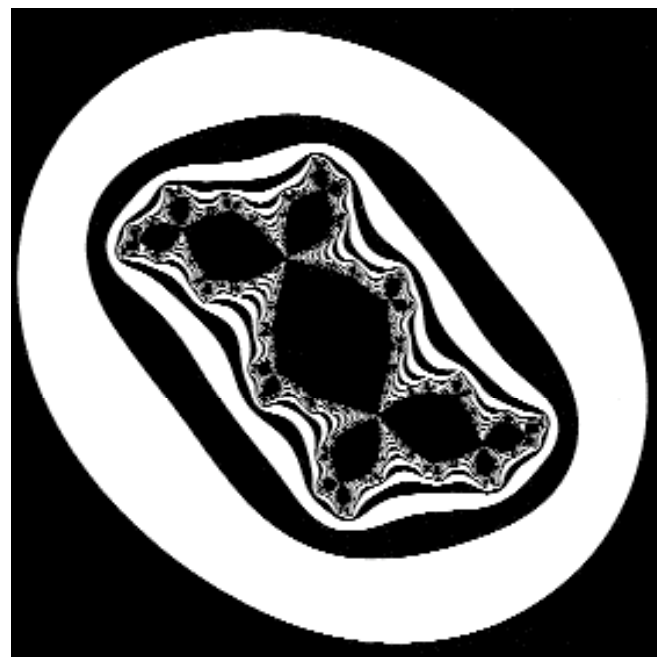
Los fractales pueden utilizarse con provecho en ecología por su característica autosimilar en distintas escalas —claro que en los sistemas naturales la escala se ve limitada por la estructura física. Las aplicaciones de los fractales en ecología y evolución se observan en la medición del hábitat, donde a mayores escalas pueden encontrarse

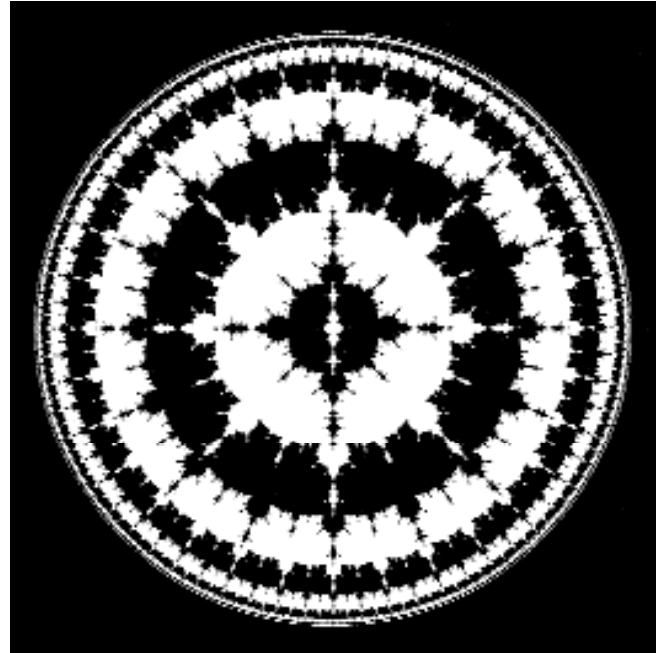
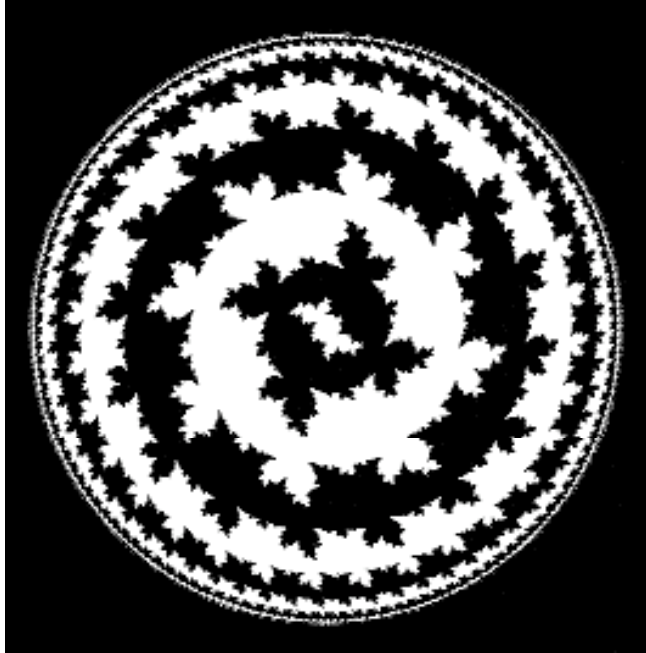
más especies por unidad de volumen; en la estructura de muchas formas como hojas y vasos sanguíneos; en la manera como están agrupadas las especies en géneros, pues podría decirse que los árboles filogenéticos siguen una estructura fractal; en las estadísticas de extinción, donde se percibe un patrón autosimilar entre las cinco grandes extinciones de la historia, su recuperación y periodos de estasis. Puede decirse que toda la alometría sigue una estructura fractal derivada de las ecuaciones en potencia. Esto se debe a que en la naturaleza se producen fenómenos de autorganización que conducen a la estructura anidada típica de los fractales, incluso podría esperarse que este comportamiento sea tan ubicuo que permitiría llegar a una teoría unificada de los sistemas biológicos.

### Caos, microevolución y macroevolución

Para probar que en pequeñas escalas evolutivas también se presentan comportamientos caóticos se han usado diferentes modelos que implican series de tiempo menos largas que las utilizadas para macroevolución. Así, se ha probado la presencia de fluctuaciones caóticas en la frecuencia genotípica —proporción de un genotipo, que es el conjunto de la información genética que porta un individuo, en una población— en casos donde la adecuación del heterocigoto —que representa la proporción de la contribución de un individuo que porta un gen o alelo dominante de un progenitor y uno recesivo del otro a las siguientes generaciones— es la media de la adecuación de los homocigotos —individuos cuya constitución genética consiste en el mismo alelo, dominante o recesivo, para un carácter hereditario—, y donde los heterocigotos tendrían un efecto destructivo sobre los homocigotos y sobre ellos mismos, aunque en el último caso más ligero. Si a este comportamiento se asocia una baja adecuación promedio y una alta fecundidad se obtiene una fluctuación caótica, lo que puede probarse para organismos como *Tribolium*. Este resultado comprobó que, en genética de poblaciones, incluso en los modelos sencillos de densodependencia, que depende de su densidad, se pueden observar comportamientos complejos. En este caso la selección natural implica la aparición de caos. Las otras fuerzas de la evolución también pueden llevar a fluctuaciones caóticas, como los mutadores —cepas altamente mutables de algunas bacterias como *Escherichia coli*— en entornos fluctuantes. Las cepas más susceptibles de mutación se adaptan en ambientes más fluctuantes, las menos mutables tienen mayor

adecuación en ambientes estables, y en ambientes intermedios mutan cíclicamente. Sin embargo, en un medio donde los cambios sean muy variables —estocásticos o caóticos— las cepas más exitosas serán las que muten en forma compleja, caótica. Este tipo de fluctuación podría permitir una pronta adaptación a los continuos cambios ambientales. El estudio de estrategias evolutivamente estables, producto de la competencia entre fenotipos convergentes en un estado de mayor adecuación para toda una población, el cual es consecuencia de la búsqueda de cada individuo por aumentar la suya, también proporciona resultados interesantes. Por ejemplo, se demostró que la tasa de supervivencia y el reclutamiento pueden llevar a un compromiso (*trade-off*) entre semelparidad —organismos que se reproducen sólo una vez; el nombre proviene de Semele, amante de Zeus que murió al ver al Dios en todo su esplendor— e iteroparidad —organismos que se reproducen más de una vez. Cuando la dinámica de la población es densodependiente se presentan tres posibles resultados: un equilibrio estable, donde la estrategia evolutiva sería semelparidad; un escenario donde el equilibrio estable mantenga la semelparidad y también haya dinámica no lineal con iteroparidad como estrategia evolutiva; y un estado donde ambas estrategias sean mutuamente invasivas, entonces no existiría equilibrio, por lo que podría presentarse una fluctuación caótica. En escalas microevolutivas, el caos puede ser adaptativo, como



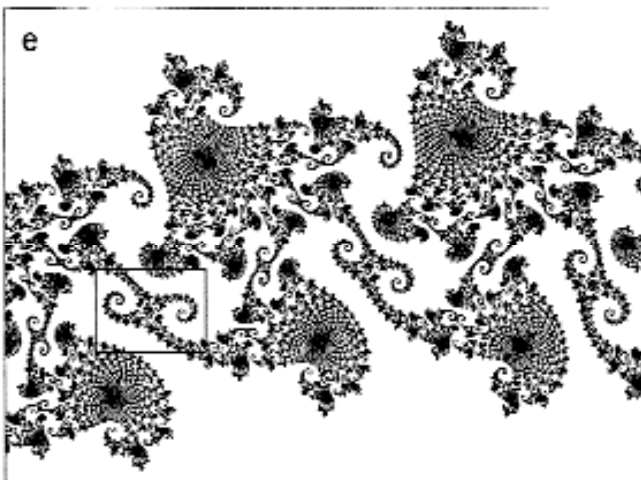
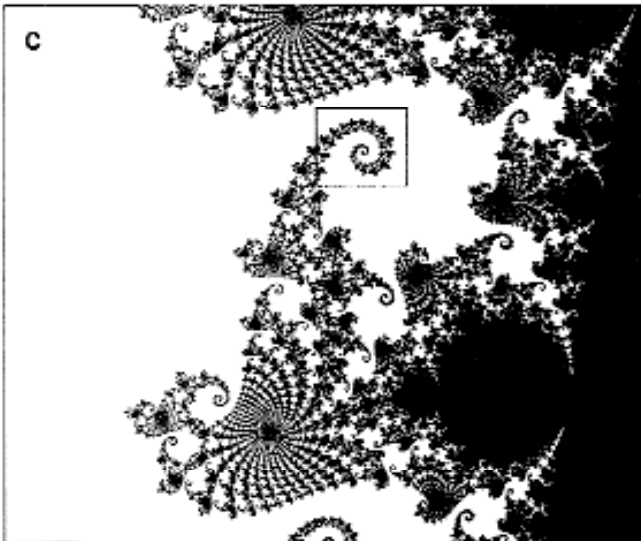
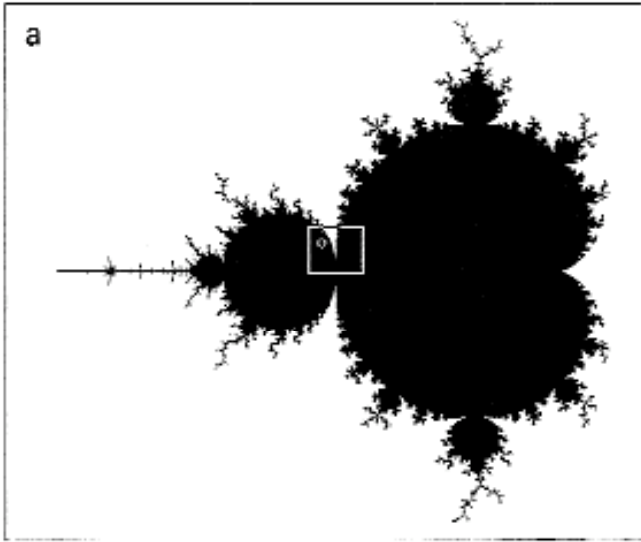


en el caso de los mutadores, manteniendo a las cepas más exitosas en los ambientes más variables, y además puede servir como mecanismo estabilizador. Aunque en pequeña escala las oscilaciones caóticas pueden conducir a extinciones locales, en un contexto global el caos evitaría las extinciones —por ejemplo, de una metapoblación— mediante asincronías locales probablemente debidas a las condiciones iniciales. Esto implica que en el espacio global el caos sería un mecanismo estabilizador que propicia la permanencia.

En el contexto macroevolutivo también se percibe la presencia de dinámicas no lineales, como la autosimilitud en las estadísticas de extinción del registro fósil, indicio de una estructura fractal, que se presenta a diferentes escalas temporales y sugiere regularidad en el registro de extinciones. Por esto, se ha propuesto que causas extrínsecas e intrínsecas a la biología de las especies pueden influir en la extinción regular de géneros y que los ciclos de extinción se repiten cada 26 millones de años. La inspección en el registro de extinciones de los tiempos medios de vida de diferentes géneros y de la distribución de frecuencias en ese registro indica que en tiempos geológicos la extinción se ajusta a una función de potencia decreciente. Esto puede implicar que existe una respuesta no lineal de la biósfera a perturbaciones como, por ejemplo, los meteoritos. Las causas de las extinciones pueden deberse a una multitud de factores, incluyendo

uno intrínseco, que sería la dinámica no lineal de la biósfera, actuando como consecuencia de perturbaciones externas o internas. Otro patrón macroevolutivo que puede considerarse no lineal es el de abundancia de los taxa. Al considerar la agrupación de especies por género y de taxa, en el más inclusivo se produce una serie de bifurcaciones que se ajustan muy bien con el proceso de bifurcación matemática conocido como Galton-Watson, una construcción fractal probabilística dependiente de factores estocásticos, más que de un proceso de criticalidad autorganizada.

Los sistemas dinámicos tienden a evolucionar hacia estados lejanos al equilibrio crítico. Se ha propuesto que este mecanismo puede ser la criticalidad autorganizada; es decir, cuando sistemas complejos lejanos del equilibrio evolucionan espontáneamente hacia un estado crítico donde se producen avalanchas periódicas de actividad. Es como cuando se acumula arena en una superficie, al principio se tiene una acumulación sin cambios, luego comienzan a surgir pequeñas avalanchas que posteriormente pueden llevar a varias de mayor magnitud y periódicas. Se ha considerado que cuando un genotipo muta y aumenta su adecuación, baja instantáneamente la de otros genotipos, lo que llevaría a que sean favorcidas las mutaciones de los otros para aumentar su adecuación, resultando una coevolución, que sería una avalancha de coevolución en un tiempo relativamente breve.



La escala más amplia a la que se ha propuesto un sistema evolutivo es la de *Gaia*, teoría que propone que a escala planetaria hay un sistema cibernético autoorganizado y abierto a la materia y la energía, que tiene como límite superior la exósfera y como inferior la corteza susceptible a la acción de la intemperie; es decir, sus límites abarcan tanto la zona influida por la vida, como la que a su vez la influye. Este sistema posee amplios mecanismos de retroalimentación espacial y temporal, ya que la vida ha moldeado las características del planeta, diferenciándolo de los otros del sistema solar, como Venus o Marte, consolidando un sistema estable con cambios en formas pero relativamente constante en el tiempo. Sus principales postulados es que la vida afecta el ambiente, de donde toma energía libre para disminuir su propia entropía, liberando a su vez productos de desecho ricos en entropía. Simultáneamente, la vida se ve limitada por el ambiente que puede definir la habitabilidad de un sitio. Los organismos vivos tienen como propiedades el crecimiento y la reproducción, y se determinan los genotipos dominantes por selección natural. Se puede considerar que *Gaia* es un sistema adaptativo complejo. Complejo viene del griego *Pleko* que significa entretrejado. La teoría de la complejidad, que busca los orígenes de la organización, puede considerarse una extensión de la cibernética. Un problema complejo no puede entenderse mediante el conocimiento de las partes, debido a que posee propiedades únicas no explicadas a partir de sus componentes. La complejidad es percibida como un subconjunto de los sistemas dinámicos, y a su vez se subdivide en sistemas ordenados, críticos y caóticos. Los sistemas complejos adaptativos constan de tres elementos, diversidad e individualidad de componentes, interacción entre los componentes y un proceso autónomo de selección, basado en la interacción que permite la perpetuación. De estos elementos se desprenden propiedades como adaptación continua, ausencia de control global, organización jerárquica, novedad perpetua y dinámicas lejanas al equilibrio. Como la segunda ley de la termodinámica prohíbe la autoorganización resultante de las propiedades emergentes de los sistemas complejos adaptativos, éstos son disipativos.

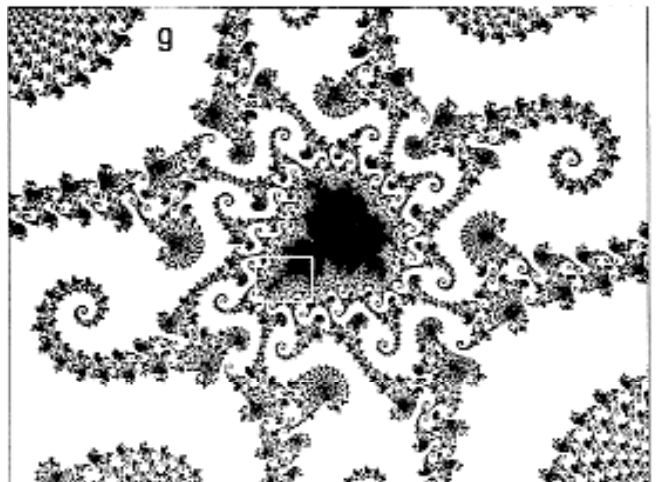
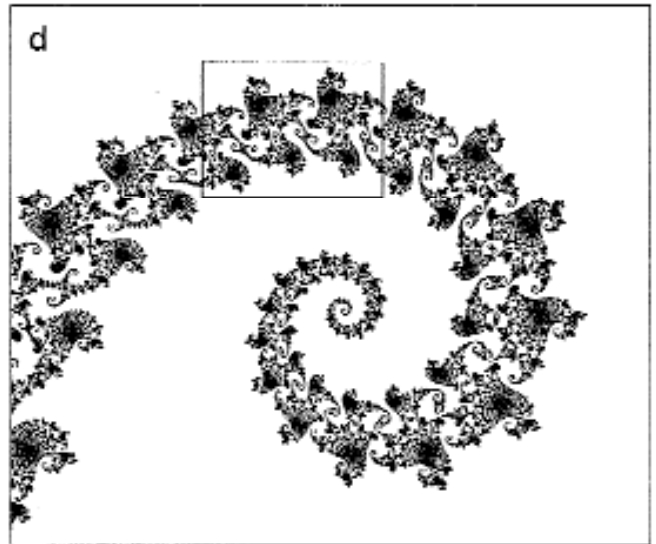
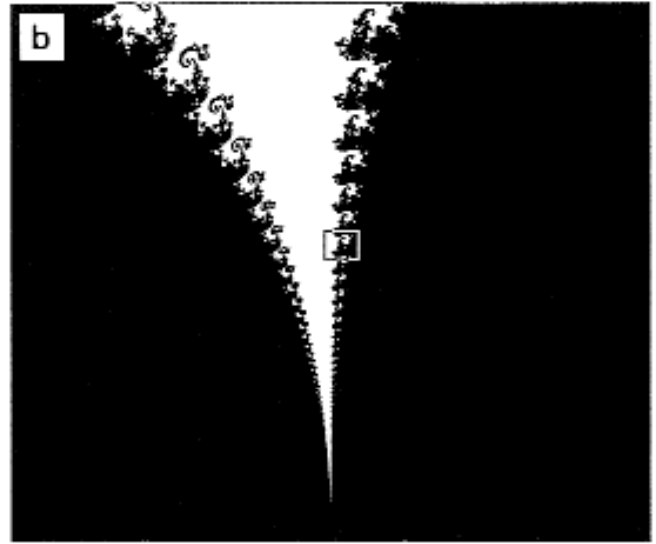
Así, *Gaia* posee propiedades emergentes en función de la diversidad e individualidad de componentes interactuantes bajo un proceso autónomo —selección natural. Es un sistema complejo pues está lejano al equilibrio, es regenerativo y presenta una jerarquía en sus partes. Se po-

dría considerar que es adaptativo porque sus partes han llevado a flujos geológicos, bioquímicos y físicos que se modifican con el tiempo. Si se revisa la historia de la Tierra se puede observar que ha transitado a un período con una alta productividad y biodiversidad, el cual se ha mantenido más o menos estable desde el tránsito de una atmósfera reductiva a una oxidativa.

### Consideraciones finales

El resultado de la evolución es la biodiversidad y ambos sistemas son complejos. La actual interacción de los componentes de la biodiversidad se puede estudiar mediante herramientas como las redes complejas, que están sujetas a comportamientos dinámicos. De esta manera se trata de comprender las redes tróficas y las cadenas metabólicas. Para estudiar la evolución se ha propuesto un modelo que demuestra que un sistema ecológico sencillo, a lo largo del tiempo, puede desencadenar fluctuaciones en la frecuencia de extinciones que se ajustan muy bien con el equilibrio puntuado. En un paisaje adaptativo donde ninguna especie adquiere un máximo de adecuación, una que mute y alcance mayor adecuación a costa de las otras interactuantes desencadenará una explosión de cambios hasta llegar a un período de estasis. Esta idea implica que un modelo no lineal puede explicar bien la teoría del equilibrio puntuado de Niles Eldredge y Stephen Jay Gould. En este caso, el puntualismo sería visto como un comportamiento esperado de la dinámica no lineal de una función de potencia, que se ajusta a la cadena de radiaciones adaptativas y a la de extinciones. Dado que el modelo contempla ambas posibilidades, pueden esperarse extinciones de gran magnitud cada determinado tiempo, lo que correspondería a los ciclos de 26 millones de años propuestos por Sepkoski. Las extinciones y otros procesos macroevolutivos pueden presentarse sin necesidad de invocar causas distintas a la dinámica propia de la evolución.

¿Es la evolución un sistema fractal? Es posible que los procesos microevolutivos estén regidos por leyes deterministas no lineales, y que también los macroevolutivos sean consecuencia de la dinámica no lineal. La idea de protectorados sugiere que los procesos regidos por dinámicas no lineales en sistemas muy distintos, pueden presentar el mismo resultado estructural o el mismo tipo de fluctuación en el tiempo. Es posible que se presente un protectorado en los patrones evolutivos; sin embargo, se ha demostrado que muchos procesos en evolución son li-



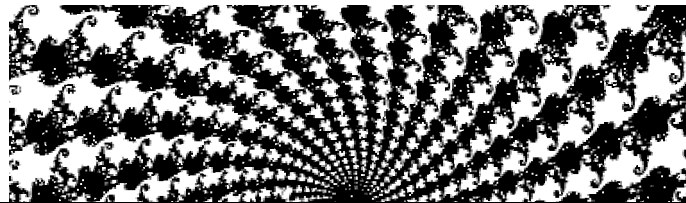


neales, como la selección natural. El hecho de que se presenten comportamientos que no tienen ninguna relación con la no-linealidad no implica que se descarte este modelo de estudio, al contrario, puede enriquecer al modelo. No es posible llegar a un total entendimiento de la naturaleza ya que desconocemos las condiciones iniciales de casi todos los fenómenos.

La aparición de la vida y su incremento en complejidad estructural no es un proceso surgido entre un mar de posibilidades, en palabras de Cocho y Miramontes, es necesario separar lo posible de lo viable. Actualmente muchos pensadores proponen que la aparición de la vida y su posterior evolución es un proceso necesario dadas las condiciones de un planeta como la Tierra, y que es un proceso que, de repetirse las mismas condiciones, volvería a

sucedir, con entidades distintas, pero con vida. Estas ideas sugieren que los sistemas autorganizados no son productos estocásticos sino necesarios, lo que indica que el caos determinista está profundamente asociado con la aparición de la vida y la evolución.

Arturo Rosenblueth, un ferviente determinista, planteaba con mucha razón que la ciencia es un modelo de la naturaleza y como tal está limitado. El mejor modelo simplemente será el que explique mejor los fenómenos, pero nunca podrá ser tan exacto como para reconstruir la realidad, en el momento que se pueda reconstruir, la ciencia ya no será necesaria, como sucede en el cuento *El arte de la cartografía* de J. L. Borges. Entonces hay que explorar los sistemas no lineales como modelos simplificados de la naturaleza, pero tal vez más explicativos que los lineales. ☹



Rodrigo Méndez Alonzo  
Instituto de Ecología, A. C.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Forbes, S. A. 1887. "The lake as a microcosm", en *Foundations of Ecology. Classic Papers with Commentaries*, L. A. Real y J. H. Brown (eds.), University of Chicago Press, Chicago.

Volterra, V. 1926. "Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically", en *Foundations of Ecology. Classic Papers with Commentaries*, L. A. Real y J. H. Brown (eds.), University of Chicago Press, Chicago.

May, R. M. 1974. "Biological populations with non-overlapping generations: stable points, stable cycles and chaos", en *Foundations of Ecology. Classic Papers with Commentaries*, L. A. Real y J. H. Brown (eds.), University of Chicago Press, Chicago.

Gilpin, M. 1975. "Limit cycles in competition communities", en *Am. Nat.*, vol. 109, núm. 965, pp. 51-60.

Schaffer, W. M. y M. Kot. 1985. "Do strange attractors govern ecological systems?", en *Bioscience*, vol. 35, núm. 6, pp. 342-350.

Schaffer, W. M. 1985. "Order and chaos in ecological systems", en *Ecology*, vol. 66, núm. 1, pp. 93-106.

Berryman, A. A. y J. A. Millstein. 1989. "Are ecological systems chaotic- and if not why not?", en *TREE*, vol. 4, núm. 1, pp. 26-28.

Huisman, J. y F. J. Weissing. 1999. "Biodiversity of plankton by species oscillations and chaos", en *Nature*, núm. 402, pp. 407-410.

Sugihara, G. y R. M. May. 1990. "Applications of fractals in ecology", en *TREE*, vol. 5, núm. 3, pp. 79-86.

Talanquer, V. 2002. *Fractus, fracta, fractal. fractales, de laberintos y espejos*. Fondo de Cultura Económica, México.

Brown, J. H., V. K. Gupta, B. Li, B. T. Miller, C. Restrepo y G. B. West. 2002. "The fractal nature of nature: power laws, ecological complexity and biodiversity", en *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, núm. 357, pp. 619-626.

Altnerberg, L. 1991. "Chaos from linear frequency dependent selection", en *Am. Nat.*, núm. 138, pp. 51-68.

Travis, J. M. J. y E. R. Travis. 2002. "Mutator dynamics in fluctuating environments", en *Proc. R. Soc. Lond. B.*, núm. 269, pp. 591-597.

Nash, J. 1950. "Equilibrium points in N-person games", en *PNAS*, núm. 36, pp. 48-49.

Ferrière, R. y G. A. Fox. 1995. "Chaos and evolution", en *TREE*, vol. 10, núm. 12, pp. 480-485.

Bascompte, J. y R. V. Solé. 1995. "Rethinking complexity: modelling spatiotemporal dynamics in ecology", en *TREE*, vol. 10, núm. 9, pp. 361-366.

Chu, J. y C. Adami. 1999. "A simple explanation for taxon abundance patterns", en *PNAS*, vol. 96, núm. 26, pp. 15 017-15 019.

Lenton, T. M. y M. van Oijen. 2002. "Gaia as a complex adaptive system", en *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, núm. 357, pp. 683-695.

Strogatz, S. H. 2001. "Exploring complex networks", en *Nature*, núm. 410, pp. 268-276.

Sneppen, K., P. Bak, H. Flyvbjerg, y M. H. Jensen. 1995. "Evolution as a self-organized critical phenomenon", en *PNAS*, núm. 92, pp. 5 209-5 213.

Cocho, G., y P. Miramontes. 2000. "Patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectores", en *Ciencias*, núm. 59, pp. 14-22.

Kauffman, S. A. 1993. *The origin of order*. Oxford University Press, Nueva York.

Rosenblueth, A. 1981. *El método científico*. J. García Ramos (comp.), Conacyt, México.

#### IMÁGENES

Heinz-Otto Peitgen y Diezmar Saupe (comp.) *The science of fractal images*, 1988.