Caos *versus* caos

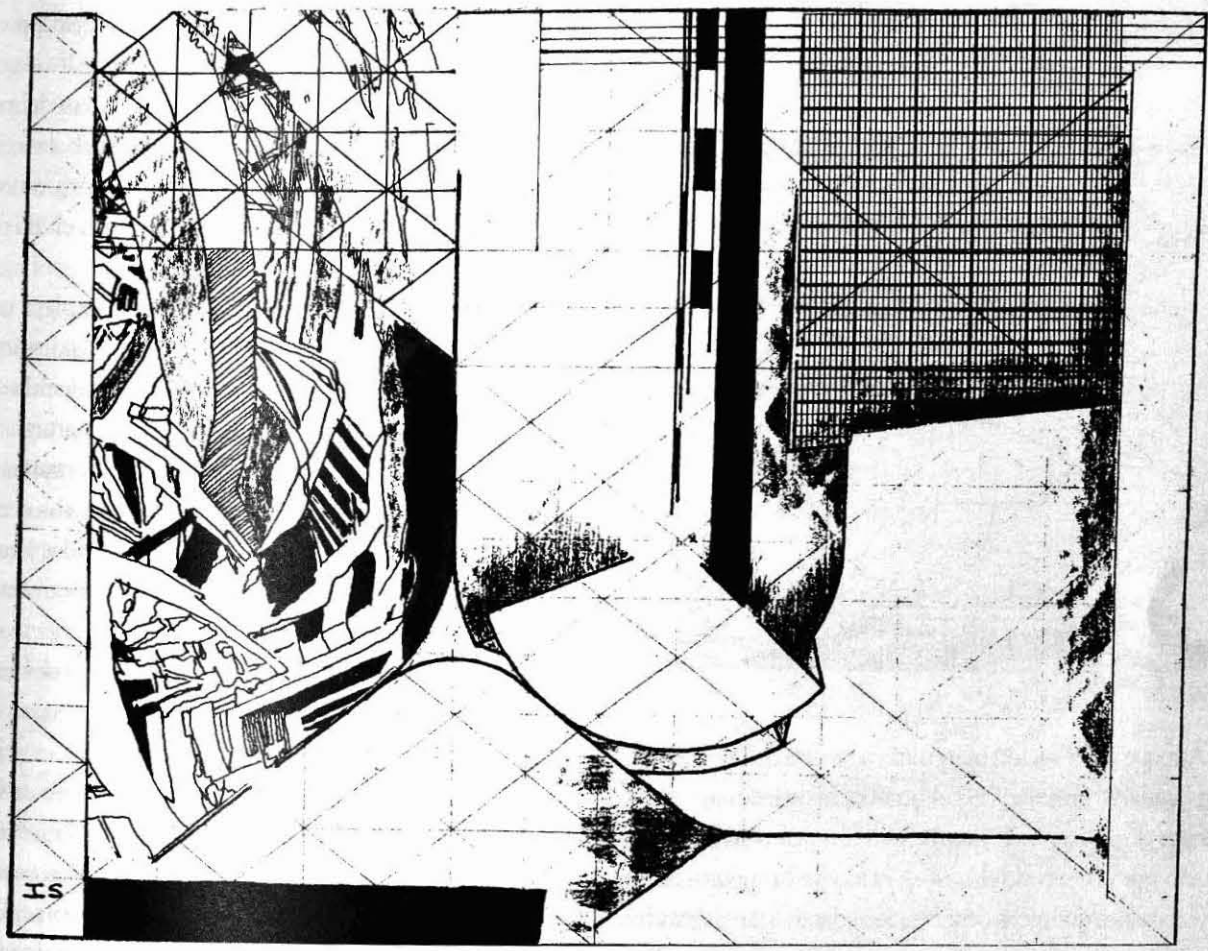
◆

Enrique Otero Siliceo

Para los sistemas caóticos las trayectorias son eliminadas a partir de sus descripciones probabilísticas [...] la descripción probabilística es irreductible...

I. Prigogine: *Les lois du chaos*

Aunque en forma muy reciente y radical se plantea que la noción física, teórica y matemática del caos obliga a repensar la idea de "ley de la naturaleza" y que la existencia de sistemas dinámicos caóticos marca supuestamente una separación radical del punto de vista tradicional, en lo fundamental determinista, estos planteamientos han tenido mucha influencia, sobre todo entre los grupos de no expertos, en disciplinas como la filosofía y los círculos culturales, como índices de que el caos, los fenómenos no lineales y la "flecha del tiempo" han llevado a una profunda revolución de nuestra forma de pensar... Sin embargo, para nosotros es real que la noción del caos no invalida, al menos, el punto de vista clásico determinista y que la existencia de los sistemas dinámicos caóticos más bien lo fortalecen. Actualmente, resulta claro que lo que se ha considerado con el nombre de caos es uno de los mayores progresos científicos, aunque no tiene las implicaciones filosóficas radicales que a veces se le han atribuido, ya que a menudo ellas se fundamentan en una seria confusión entre determinismo y predictibilidad. En forma muy concreta, el concepto de determinismo tiene que ver con el modo en que se comporta la naturaleza y la noción de predictibilidad se relaciona con lo que nosotros, los seres humanos, somos capaces de observar, analizar y computar. En otros términos, si se admite que algunos fenómenos físicos obedecen leyes deterministas, también deberá aceptarse que algunos fenómenos físicos, aunque deterministas, no son predecibles, quizás por razones circunstanciales o accidentales. Una vez que esto se admite, puede resultar difícil demostrar que cualquier sistema impredecible es de verdad no determinista y que la ausencia de predictibilidad no se debe meramente a alguna limitación de nuestras capacidades. No se puede inferir indeterminismo a partir sólo de nuestra ignorancia. Para Maxwell, también fue evidente que, en un universo perfectamente determinista, pequeñas causas pueden tener grandes efectos... La forma más simple de definir un sistema caótico se basa en la sensibilidad de la condición inicial. Esto significa que, para cualquier condición inicial del sistema, existe alguna otra condición inicial arbitrariamente cercana a la primera y que, si esperamos lo suficiente, los dos sistemas terminarán siendo marcadamente diferentes. Es decir que un pequeño error o cambio arbitrario en las condiciones iniciales propiciará enormes diferencias a largo plazo. Pero esto no puede influir en nuestro concepto del indeterminismo, ya que siempre cometeremos algún error al medir las condiciones iniciales si se asume desde el principio que el sistema obedece a alguna ley determinista. En la misma línea, Maxwell acuña la máxima de que "las mismas causas producirán siempre los mismos efectos", por lo que pequeñas variaciones de las condiciones iniciales pueden llevar a grandes variaciones después de algún tiempo. El mismo autor agrega posteriormente otro principio que no debe confundirse con el primero: "causas parecidas producirán efectos parecidos", lo cual sólo será verdad cuando pequeñas variaciones en las circunstancias iniciales produzcan sólo pequeñas variaciones en el estado final del sistema. En cambio, si el sistema no obedeciera ninguna ley o

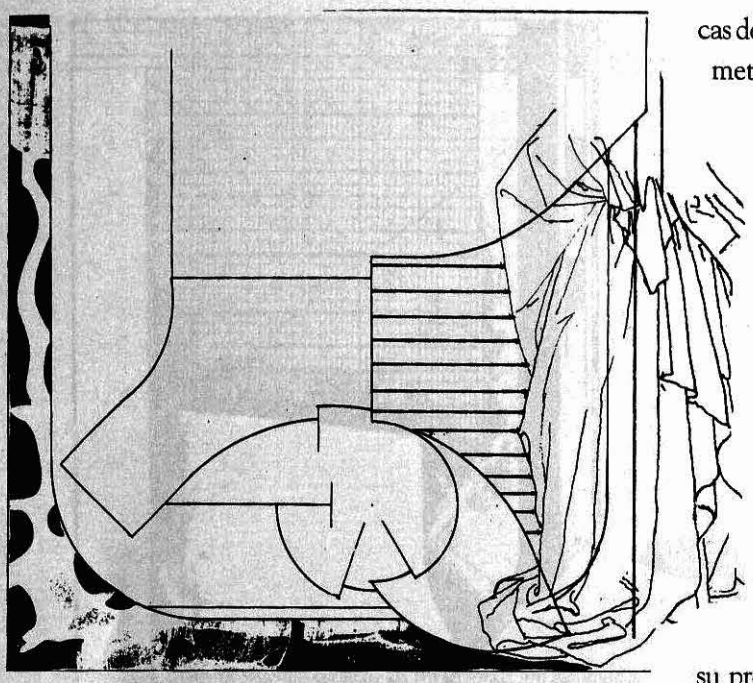


siguiera un comportamiento estocástico, dos sistemas cuyas condiciones iniciales son exactamente las mismas podrían alcanzar dos diferentes estados finales después de un tiempo. Desde el punto de vista de la biología, el planteamiento es puntualmente igual, ya que tratamos con sistemas dinámicos y desconocemos la totalidad de sus factores determinantes, por lo que unas veces parecen responder a un comportamiento estocástico y otras, cuando se trata de los sistemas más simples o mejor conocidos, resulta evidente su determinismo. Cuando enfrentamos tales sistemas dinámicos caóticos, surge esta pregunta del médico: ¿en estos mismos sistemas biológicos, *es saludable ser caótico?* La mayor parte de las veces, un ataque epiléptico deja una imagen en el electroencefalograma (EEG) que el especialista no puede confundir. De la misma manera que el funcionamiento del cerebro normal es el epítome de una estable-irregularidad, la cadencia patológica del ataque epiléptico es impresionante. Cuando la crisis aparece, el EEG registra un movimiento total y más violento.

Tanto la crisis epiléptica como el ataque cardiaco pueden considerarse "enfermedades dinámicas", expresión sugerida por los fisiólogos León Glass y Michael Mackey, de la Universidad de McGill, para patologías caracterizadas por un cambio en los ritmos normales del organismo. Todos los médicos saben de desórdenes que se distinguen por tales alteraciones de los ritmos, incluidas fluctuaciones en la cuenta de leucocitos, como en la leucemia, y en el ritmo respiratorio, como en el Cheyne-Stokes, que frecuentemente se acompaña de insuficiencia cardiaca.

Pero, ¿cuáles son los ritmos normales del cuerpo? La contestación más común es que un cuerpo saludable tiene ritmos simples. Desde este punto de vista, las diferentes partes del cuerpo tienden a la homeostasis, donde los sistemas interrelacionados alcanzan un equilibrio o tienen algún comportamiento periódico simple. Una alteración patológica tendrá un tiempo más complicado y menos controlado.

En un intento revisionista del pensamiento neurológico se puede invertir esta interpretación. De acuerdo con ello, una "aún incompleta teoría" plantea que un sistema fisiológico saludable tiene una cierta cantidad de variabilidad innata, y la pérdida de ésta acarreará una transición a un estado más ordenado, menos complicado, que señalará una alteración. Esa saludable variabilidad no ocurre al azar ni constituye una fluctuación incontrolada. Es un cierto y bien armonizado *caos*.



Aunque la definición matemática precisa del *caos* es algo complicada, su presencia en el organismo puede caracterizarse por dos factores. Primero: está ahí por diseño, no es causado por un encendido estocástico de las neuronas ni por reacciones químicas desencadenadas al azar. Segundo: el comportamiento de un sistema caótico es complicado e impredecible. Aunque el sistema puede mantenerse dentro de ciertos límites, la complejidad de su comportamiento desafía las predicciones específicas. "Puede ser que el caos sea la forma natural para poner juntas las diferentes situaciones del organismo", ha sugerido Al Goldberger, quien ha realizado un extenso análisis de corazones normales y enfermos y afirma que "el *caos* provee al cuerpo de la flexibilidad para responder a diferentes estímulos: los sistemas saludables no desean la homeostasis, desean el caos".

Quienes estudian el *caos* y otras complicadas dinámicas del organismo piensan que el conocer mejor los ritmos biológicos, sanos y enfermos, permitirá a los médicos formular diagnósticos y pronósticos más certeros. La meta es optimizar la asistencia para la salud con base en el entendimiento exacto de la forma en que diferentes tratamientos afectan la dinámica del cuerpo humano.

A la fecha, el mejor ejemplo documentado del *caos* fisiológico proviene de los estudios *in vitro* de células embrionarias de corazón de pollo. Un grupo de ellas puede latir espontáneamente con un ritmo innato regular y la aplicación de un fuerte estímulo eléctrico causará que el siguiente latido sea más temprano o más tardío. En términos matemáticos, se reinicia la fase del latido. Si se aplican series periódicas de choques electricos, las células son empujadas por dos metrónomos: su propio ritmo interno y el de los choques eléctricos. El latido resultante dependerá del ritmo del estímulo eléctrico. En algunos casos, las células latirán a tiempo con el estímulo; pero en otros, parecerán latir al azar y nunca caerán en un ritmo periódico.

Éste es el *caos*: una conducta compleja, no periódica, que resulta de mecanismos fisiológicos de control. Aunque el *caos* puede ser inducido artificialmente, ocurre también en forma natural.

Al analizar matemáticamente las variaciones de los ritmos cerebrales y cardiacos, se ha concluido que son caóticas, que son complicadas y que son impredecibles, pero también que resultan deterministicamente de la forma en que cada órgano regula su propio funcionamiento, más que de fluctuaciones. El número de investigadores que han encontrado *caos* en las señales del EEG es cada día mayor.

Agnes Babloyantz, de la Universidad Libre de Bruselas, analizó el EEG de cerebros normales y de cerebros con epilepsia y concluyó que ambas señales exhiben *caos*, pero que un cerebro sano es más caótico que uno con epilepsia, lo cual implica que un ataque epiléptico se acompaña de una pérdida de la variabilidad de la actividad eléctrica cerebral.

Frecuentemente, el conocimiento matemático de un campo lleva a la certidumbre y a una consecuente seguridad en otros. La teoría del *caos* es uno de estos casos. El nombre de este campo matemático, como el de su más cercano pariente, la teoría de la catástrofe, parecen en particular aptos para la creatividad del inicio del siglo XXI. Esta teoría del *caos* no tiene nada que ver con los anarquistas ni con los surrealistas ni con el manifiesto *dadaísta*, sino con el comportamiento de sistemas arbitrarios no lineales. Por un *sistema* debe considerarse cualquier colección de partes cuya interacción es descrita por reglas y ecuaciones. El aparato circulatorio, el sistema nervioso central, el sistema telefónico de la Ciudad de México y el sistema operativo de una computadora son todos ellos ejemplos de esa vaga noción de *sistema*.

Un sistema no lineal es aquel cuyos elementos —otra vez empleando una expresión coloquial— no están ligados en una forma lineal o proporcional, como sí lo están las escalas de un termómetro y las de una balanza de laboratorio. En esos sistemas no lineales, duplicar la magnitud de una de las partes no duplica la de las otras ni en ellos la efe-

rencia es proporcional a la aferencia. Para entender estos sistemas se llega a modelos de manipulación, a formulaciones matemáticas y a simulaciones por computadora, con la esperanza de que las propiedades de tales modelos más austeros arrojen luz sobre los sistemas naturales en cuestión.

En 1960, mientras jugaba con un modelo del clima en computadora, el meteorólogo Edward Lorenz descubrió algo muy extraño: inadvertidamente manejó cifras qué diferían por más de una parte de mil y las introdujo al modelo; pronto divergían más y más, hasta que aparentemente no hubo ninguna relación entre una y otra. Éste fue el principio de la matemática de la ahora llamada teoría del *caos*. Aunque su modelo no lineal fue simplista y su equipo de computación primitivo, Lorenz efectuó la correcta inferencia de esta divergencia del clima simulada por la computadora, causada por mínimas variaciones de las condiciones iniciales del sistema.

Por lo general, los sistemas cuyo desarrollo es gobernado por reglas no lineales y por ecuaciones que pueden ser en extremo sensibles a tales cambios minúsculos, frecuentemente manifiestan conductas impredecibles y *caóticas*. En contraste, los sistemas lineales son más robustos, pues en ellos las pequeñas diferencias de las condiciones iniciales dan lugar sólo a pequeñas diferencias en los resultados finales. El clima, aun con el más simple de sus modelos, no es susceptible de predicciones a largo plazo, ya que resulta muy sensible a los cambios más imperceptibles de las condiciones iniciales.

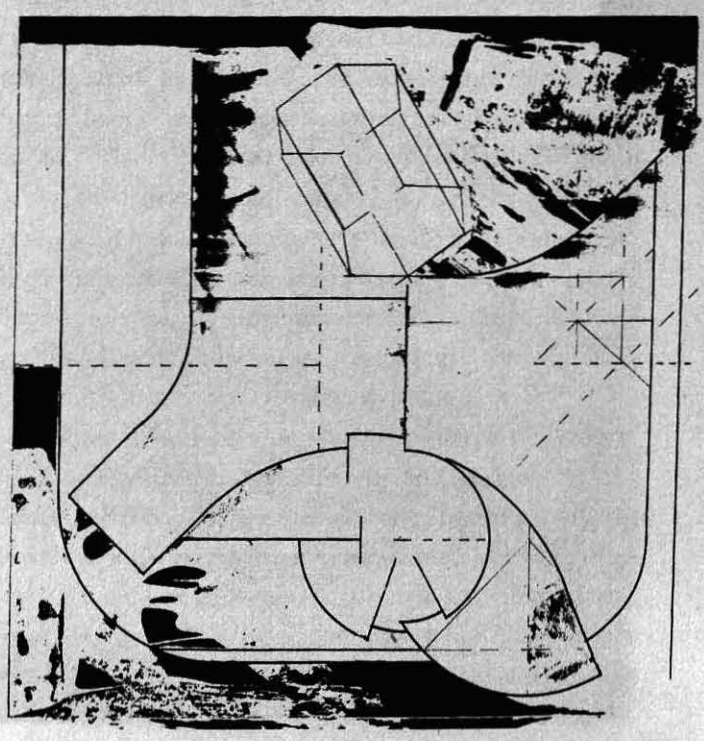
El proceso total hace el efecto cascada en el tiempo y en el espacio dentro de lo no repetitivo y de lo impredecible. Desde los trabajos de Lorenz han aparecido muchas manifestaciones del tan llamado efecto mariposa: la notoria dependencia de los sistemas no lineales de sus condiciones iniciales, en disciplinas que van de la hidrodinámica (turbulencias y flujos de líquidos) a la física (osciladores no lineales) y de la biología (epilepsia y fibrilaciones cardiacas) a la economía (fluctuaciones de precios). Estos sistemas no lineales se distinguen por su sorprendente complejidad, que parece surgir aun cuando los sistemas estén definidos por muy elementales reglas y ecuaciones. Se puede asumir que al estado de los sistemas, en cualquier instante, se le puede asignar un punto en un multidimensional espacio-fase matemático, y que su evolución subsecuente corresponde, entonces, a una trayectoria en ese mismo espacio-fase abstracto. Estas trayectorias de los sistemas no lineales tienden a ser aperiódicas e impredecibles, mientras que a la gráfica de todas las posibles trayectorias de uno de estos sistemas corresponde una frecuencia increíblemente convulsionada, y cuando se las examina con cuidado se evidencian más intrincadas. Aun la más cercana inspección de las trayectorias de estos sistemas espacio-fase revelan pequeños vórtices y complicaciones de la misma especie. En general, el conjunto de todas las posibles trayectorias de estos sistemas no lineales constituye lo que se conoce como fractales.

Una de las características más conspicuas de los sistemas caóticos es que éstos se comportan a menudo muy normalmente y sin grandes cambios dentro de un amplio rango de condiciones iniciales y, súbitamente, se vuelven caóticos cuando algún parámetro del sistema llega o alcanza ciertos valores críticos. Uno de los ejemplos más claros de este tipo de sistemas es el que corresponde, en forma hipotética, al crecimiento de una determinada población animal, expresado por esta fórmula no lineal:

$$X' = RX\,(1 - X)$$

En donde X' es la población de un año, X la población del año anterior y R una cifra que varía entre 0 y 4; para simplificar, se toman X y X' como números entre 0 y 1, cuando la verdadera población es 1 000 000 veces superior a estos valores. ¿Qué pasa a la población de esta especie animal en el tiempo, si R es igual a 2?

Si asumimos que la población X es ahora 0.3 (es decir 300 000), calcularemos, mediante la sustitución en la fórmula, la población del siguiente año:



$$2*(0.3)*(0.7) = 0.41$$

Para obtener la población del siguiente año, se incluye 0.41 en la siguiente fórmula y se encuentra:

$$2(0.41)*(0.59) = 0.4838.$$

Con el mismo procedimiento, encontramos que la población, hasta seis años adelante, se estabilizará en 0.5. Podríamos encontrar que, cualquiera que fuera su valor original, la población se estabilizará en 0.5. A este valor de la población se le conocerá como el estado-estable para este valor de *R*. Cálculos similares con *R* más pequeña, por decir algo R = 1, demostrarán que, cualquiera que sea su valor inicial, la población se "estabilizará" en 0, es decir que se extinguirá. En cambio, cuando la *R* es más grande, por poner un ejemplo 2.6, para ser más específicos, se descubre, mediante el procedimiento arriba descrito, que, sin importar el valor inicial, la población ahora se estabilizará en aproximadamente 0.62, el nuevo estado-estable para esta *R*. Ahora bien, si se incrementa *R* un poco más, esta vez a 3.2, entonces, como antes, la población original no tendrá gran importancia; pero al sustituir en forma iterativa en la fórmula 3.2X* (1-X), se verá que la población de esa especie no se estabiliza en un valor, sino que eventualmente aparece en una alternancia repetitiva entre dos valores (aproximadamente entre 0.5 y 0.8). Esto es, un año la población es 0.5 y en el siguiente es 0.8. Si se eleva nuestro parámetro *R* a 3.5, veamos lo que pasa: la población inicial, una vez más, no tendrá importancia, pero esta vez en una corrida larga la población alternará en forma regular entre cuatro diferentes valores (aproximadamente entre 0.38, 0.83, 0.50 y 0.88) en años sucesivos.

Si de nuevo incrementamos mínimamente *R*, la población empezará a oscilar de manera regular entre 8 diferentes valores. Los incrementos más y más pequeños en *R* llevarán a más duplicaciones del número de valores.

Entonces, de pronto, en un valor aproximado de R = 3.57, el número de valores crecerá al infinito y la población de esa especie variará en forma impredecible (no al azar) año con año. Aún más extraño que esta variación caótica de una población es el hecho de que muy discretos y moderados incrementos en el valor de *R* pueden conducir de nuevo a una alternancia regular del número poblacional resultante, y un posterior incremento dará otra vez la variación caótica, como la observó el biólogo Robert May.

Uno de los puntos que siempre son objeto de discusión es lo que significa exactamente determinismo. ¿Es posible que la naturaleza siempre obedezca leyes deterministas? Quien admita que algún fenómeno físico obedece una ley determinista deberá admitir también que algunos fenómenos físicos, aunque deterministas, no son predecibles, debido a lo cual el predeterminismo no es fácil de explicar. La idea es que el predeterminismo depende de lo que las leyes de la naturaleza son... Es decir que, considerado el estado del sistema en un momento preciso, tendremos una fórmula, una gráfica o una ecuación diferencial que nos permitiría calcular en principio el estado del sistema en tiempos ulteriores. Para obtener esta predictibilidad, deberíamos ser capaces de medir el estado presente del sistema con suficiente precisión y de computarlo con la fórmula precisa para resolver la ecuación adecuada. Como se puede ver, en los fenómenos biológicos esto implica una enorme dificultad. Por tanto, hay alternativas al determinismo que podrían no ser leyes de ninguna manera o que podrían ser manejadas como leyes estocásticas. Es decir que el estado del sistema en un momento dado, aun si fuera conocido en todo detalle, podría determinar sólo una distribución probabilística para el mismo estado inicial en un tiempo ulterior. Entonces uno podría suponer que debe existir un inherente indeterminismo en las leyes básicas de la naturaleza. ◆

Bibliografía

A. Babloyantz y A. Destexhe, "Low Dimensional Chaos is an Instance of Epilepsy", en *Proc Nat Acad Sci*, núm. 83, 1986, pp. 3513-3517.

A. Babloyantz y J.M. Salazar, "Evidence for Chaotic Dynamics of Brain Activity During the Sleep Cycle", en *Phys Lett*, núm. 111, 1985, pp. 152-156.

L. Glass y M.C. Mackey, *From to Clocks to Chaos. The Rhythms of Life*, Princeton, Princeton University Press, 1988.

Al Goldberger, Mie Tus Je, Dr. Rigney, Ml Wood y Sm Fortney, "Effects of Head-Down Bed Rest on Complex Heart Rate Variability: Response to LBNP Testing", en *J. Appl Physiol*, núm. 77(6), 1994, pp. 2863-2869.

J.C. Maxwell, *Matter and Motion*, Nueva York, Dover Publications, 1952.

E. Otero-Siliceo, "¿Es saludable ser caótico?", en *Archivo del Instituto de Neurología y Neurocirugía*, núm. 10, México, 1995, pp. 95-97.

I. Prigogine, *Les lois du chaos*, París, Flamarion, 1994.