
Importancia del caos determinista en medicina

LUIS CARLOS BURGOS

L 00

La impredecibilidad de los sistemas, incluso de los regidos por leyes deterministas, cuando despliegan su evolución se llama caos determinista. En este artículo se revisan algunos aspectos históricos de tal concepto; se describen sus características y los métodos empleados para su estudio. Se mencionan las ventajas que ofrece el comportamiento caótico para los sistemas fisiológicos normales, contrastando el concepto de irregularidad caótica con el de homeostasia y se mencionan las implicaciones más importantes que tiene el descubrimiento de la ubicuidad del caos sobre las definiciones de salud y enfermedad.

PALABRAS CLAVE

CAOS DETERMINISTA
ATRACTOR CAOTICO
SISTEMAS DINAMICOS
ESPACIO FASICO

INTRODUCCION

Uno de los acontecimientos más memorables para la humanidad ocurrió el 28 de abril de 1686, cuando Isaac Newton entregó sus *Principia Mathematica* a la *Royal Society* de Londres. En

esta obra presentaba las leyes básicas del movimiento incluyendo la ley de la gravitación universal.

La obra de Newton dio origen a uno de los movimientos filosófico-científicos más influyentes de los últimos siglos: el **Determinismo Mecanicista**. Según esta corriente el universo y todas sus criaturas son mecanismos cuyo funcionamiento es perfectamente asequible al entendimiento humano, por lo cual es posible conocer absolutamente todas las trayectorias de evolución de cualquier sistema. Para los deterministas el azar y la aleatoriedad son producto de la ignorancia del observador, ignorancia que puede ser superada con sólo perfeccionar los instrumentos de recolección de datos.

Esta concepción del mundo originó una ciencia triunfalista que pregonaba la conquista total de la naturaleza por el hombre; el famoso apotegma de Laplace condensa esta actitud arrogante y orgullosa: "Dadme la posición y la velocidad de las partículas del universo y yo podré predecir su evolución para el resto de los tiempos".

El determinismo influyó en todas las ramas del saber infiltrándose en los cimientos de la ciencia y la cultura modernas; la misma gestación de la fisiología estuvo precedida por esta concepción. Recordemos

DOCTOR LUIS CARLOS BURGOS HERRERA, Profesor Asociado, Departamento de Bioquímica, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

el concepto de *milieu interieur* de Claude Bernard basado en las ideas de constancia y regularidad como condiciones *sine que non* para los sistemas vivos. Estas mismas ideas son las que servirían a Cannon en 1926 para enunciar su famoso principio de la homeostasia; principio rector de toda la conceptualización fisiológica del presente siglo, con una influencia tan profunda en el razonamiento médico, que tácitamente se asume que salud es igual a regularidad en tanto que enfermedad es lo contrario; incluso el papel del médico se entiende en su afán de recobrar la regularidad en el funcionamiento del organismo enfermo.

Esta ciencia majestuosa y de apariencia incombustible fue estremecida violentamente en las postrimerías del siglo XIX y principios del XX por dos hechos principales: el Principio de Incertidumbre de Heisenberg y la demostración de singularidades en las trayectorias de ciertos sistemas.

El Principio de Incertidumbre, introducido a raíz de la mecánica cuántica, muestra la imposibilidad de obtener conocimiento totalmente objetivo cuando se hacen mediciones de ciertos fenómenos: el observador, por el solo hecho de observar, perturba al objeto observado de tal forma que en estos casos siempre se introduce una incertidumbre imposible de eliminar.

La existencia de singularidades en ciertas trayectorias fue postulada por el matemático francés Jules Henri Poincaré, a finales del siglo pasado. Poincaré demostró que ciertos sistemas, regidos por leyes deterministas, presentaban trayectorias de evolución que llegaban a ciertos puntos de indeterminación en los cuales el sistema podría optar por varias posibilidades y la escogencia era un evento totalmente aleatorio; a tales puntos los llamó de singularidad por Poincaré y actualmente se conocen como puntos de bifurcación. Se caracterizan porque representan la aleatoriedad intrínseca en las trayectorias, aleatoriedad que no desaparece con la obtención de mayor información sobre el sistema. En estos puntos la indeterminación es un evento *per se* y elimina la posibilidad del determinismo futuro en el comportamiento de los sistemas.

Los trabajos pioneros de Poincaré abrieron el camino para el estudio de los sistemas intrínsecamente indeterminados; estudio que, reforzado con la ayuda del computador, ha dado origen a la actual ciencia del caos y la complejidad, cuyas influencias

en medicina vamos a mencionar en el presente artículo.

CONCEPTOS GENERALES

Para el determinismo clásico todo sistema, natural o artificial, debería presentar trayectorias de evolución totalmente predecibles para cualquier tiempo futuro. El planteamiento actual, surgido a raíz de los trabajos en sistemas dinámicos, es diferente. Actualmente se cree que la mayoría de los sistemas presentan pautas de evolución intrínsecamente indeterminadas; incluso con la ayuda del computador ha sido posible simular trayectorias de evolución para muchos sistemas y se ha observado que sólo son predecibles los muy simples y bajo condiciones ideales. Los sistemas reales presentan trayectorias que tarde o temprano, dependiendo de la complejidad del sistema, se hacen indeterminadas; incluso sistemas regidos por leyes totalmente deterministas, cuando despliegan su evolución, se hacen impredecibles al cabo de un tiempo mayor o menor. Esta impredecibilidad surgida en el seno de leyes deterministas es lo que se ha llamado el **caos determinista**.

Usualmente se obtiene la información a través de series temporales, o sea por medio de registros del cambio de alguna de las variables del sistema durante un tiempo determinado. En medicina son muy comunes estos registros, el ECG, el EEG, una curva de glicemia, etc., son ejemplos de series temporales. Estos registros pueden ser analizados de muy diversas formas, tratando de inferir a partir de ellos cuáles son las características del sistema que los originó. Puede establecerse, por ejemplo, cuál es la gama de amplitudes de la serie por medio de una técnica llamada análisis de Fourier; o pueden graficarse en un sistema especial de coordenadas llamado espacio fásico que permite dibujar la trayectoria del sistema durante un tiempo dado.

Las series temporales obtenidas a partir de sistemas naturales muestran varias características comunes:

1. Son muy irregulares y presentan un espectro de Fourier con una rica variedad de amplitudes, exhibiendo lo que se llama un amplio espectro de bandas.

2. A pesar de que durante su recorrido se mueven dentro de un rango determinado, "ensayan" todas las posibilidades dentro del mismo; por eso se dice de estos sistemas que poseen estabilidad global (por moverse dentro de un rango determinado), con ines-

tabilidad local (por ensayar todas las posibilidades dentro del rango).

3. Cuando estas series se grafican en un plano fásico, despliegan figuras geométricas complejas que reciben el nombre de atractores extraños o caóticos. El diseño de estos atractores se ha convertido en una herramienta promisoría para estudiar sistemas biológicos *in toto*.

EL CAOS DETERMINISTA EN FISILOGIA Y PATOLOGIA HUMANAS

Uno de los órganos más estudiados con esta metodología es el cerebro. A partir de trazados electroencefalográficos ha sido posible demostrar su caoticidad.

El cerebro normal es caótico en todos sus niveles (1); incluso ha sido posible diseñar el atractor cerebral para varias situaciones fisiológicas y patológicas. Lo que se ha observado a partir de estos estudios es que la caoticidad del cerebro, interpretada a partir del atractor, desciende drásticamente en algunas condiciones patológicas. Dicho en otros términos la aparición de regularidad en el funcionamiento cerebral es un signo de alteración, mientras que el mantenimiento de un comportamiento caótico es señal de buen funcionamiento.

Comparando los atractores cerebrales obtenidos de pacientes epilépticos con los obtenidos a partir de individuos sanos ha sido posible demostrar una caída brusca de la dimensionalidad del atractor durante el episodio convulsivo (2). Este descenso en la dimensión sería un indicativo de una disminución de la complejidad en el funcionamiento cerebral durante la crisis epiléptica.

Investigadores de la Universidad de California trabajando con EEG obtenidos del bulbo olfatorio, han demostrado que la percepción de los olores se establece gracias a que los patrones perceptuales se pueden sobreimponer en un fondo cerebral caótico; este caos subyacente es automantenido por el propio cerebro y es el que permite realizar respuestas flexibles y generar nuevos patrones de actividad. La percepción, según estos investigadores, dependería de esta actividad caótica colectiva que involucraría millones de neuronas distribuidas en varias zonas de la corteza (3).

Los fenómenos psicopatológicos de tipo limítrofe también se han considerado como producidos por una brusca reducción en el funcionamiento caótico

del cerebro (4). Incluso se ha demostrado que la dimensionalidad del atractor cerebral se modifica de acuerdo a los cambios en la actividad cognitiva.

Otro sistema extensamente estudiado es el corazón. Aunque la frecuencia cardíaca normal parece regular, haciendo un análisis más profundo se demuestra que presenta gran irregularidad; se observan variaciones de segundo a segundo con una pauta caótica. Comparando ECG de individuos sanos con los obtenidos de pacientes con alteraciones cardíacas se ha observado que los corazones sanos y jóvenes son más caóticos que los enfermos (5). Por ejemplo, la transición de un ritmo sinusal a una fibrilación ventricular está marcada por un cambio de espectro: el amplio espectro normal es reemplazado por uno estrecho notándose que, al contrario de lo esperado, el trazado correspondiente a la fibrilación es más regular que el trazado normal.

Por estudios retrospectivos de ECG de pacientes ambulatorios que luego han sufrido infarto de miocardio se ha observado una disminución de la variabilidad del ritmo cardíaco en los períodos previos al ataque, disminución observable incluso meses antes de la crisis.

Estos análisis matemáticos han mostrado la variabilidad del corazón sano, indicando que en condiciones de normalidad la frecuencia cardíaca fluctúa considerablemente aun en ausencia de cualquier estímulo externo fluctuante y que el mecanismo de control del ritmo cardíaco es intrínsecamente caótico y nunca alcanza el estado estacionario sugerido por el concepto de homeostasia. Incluso se ha utilizado la teoría del caos para revertir arritmias. Administrando estímulos eléctricos, a tiempos irregulares, a un corazón arritmico es posible revertirlo al ritmo sinusal (6).

Las investigaciones actuales sugieren que además de su importancia en el corazón y cerebro el caos puede jugar un papel considerable en otros sistemas fisiológicos. En algunos pacientes con leucemia, por ejemplo, el número de glóbulos blancos oscila dramáticamente de semana a semana. Se cree que esta fluctuación periódica es una manifestación de la pérdida del comportamiento caótico normal: las personas sanas tienen oscilaciones caóticas en sus niveles de células blancas sanguíneas; en cambio la oscilación en la leucemia es periódica.

Se ha sugerido (6) que el caos evita un comportamiento estrictamente periódico que sería muy perjudicial para el organismo. El funcionamiento caótico

le permite al organismo funcionar en un estado que se ha llamado "desincronización activa". Se perdería la suavidad en la contracción muscular si todas las unidades motoras se activaran sincrónicamente, produciéndose en este caso un temblor poco fluido. Se cree que el temblor del paciente con enfermedad de Parkinson puede ser causado por esta pérdida de variabilidad de algunos sistemas neuronales. También se ha visto en cultivos de células pituitarias que las más jóvenes obedecen las órdenes químicas de sus reguladores naturales en tanto que las células tumorales tienen una actividad cíclica que evita una respuesta normal a los reguladores.

El caos quizás constituya la principal propiedad de los sistemas reguladores a nivel fisiológico, dotando al organismo de una flexibilidad que le da robustez y posibilidades de respuesta novedosa ante un ambiente permanentemente cambiante.

Por décadas se ha interpretado el funcionamiento normal de los sistemas fisiológicos como orientado hacia la disminución de la variabilidad y el mantenimiento de un estado estacionario homeostático. El descubrimiento de la ubicuidad del caos en el organismo puede producir cambios radicales en nuestra manera de concebir el orden, la regularidad y la constancia en situaciones de salud y enfermedad.

A pesar de que aún existe una brecha entre la experimentación en el laboratorio y la aplicación clínica de estos conceptos, ya se vislumbran aplicaciones prometedoras en el diagnóstico y el tratamiento de muchas enfermedades.

El conocimiento profundo de los ritmos caóticos corporales puede estar abriendo el camino hacia un nuevo orden de ideas en medicina, desplegando un panorama rico y desconcertante. El caos abre la

nueva fisiología y el reto es tomar estos conocimientos y aplicarlos en beneficio de nuestros pacientes.

SUMMARY

IMPORTANCE OF DETERMINISTIC CHAOS IN MEDICINE

The unpredictability of systems, including those ruled by deterministic laws, is known as deterministic chaos. In this article some historical aspects, characteristics and methods of study of this concept are briefly described. The advantages of chaotic rhythm for physiological systems are summarized and the implications of ubiquity of chaos in human physiology for the definitions of health and disease are reviewed.

BIBLIOGRAFIA

1. WEST BJ. Fractal physiology and chaos in medicine. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1990: 1-16.
2. BABLOYANTS A, DESTEXHE A. Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy. *Proc Natl Acad Sci* 1986; 83: 3513-3517.
3. FREEMAN WJ. Physiology of perception. *Sci Am* 1989; 261: 30-38.
4. PEDIADITAKES N. Deterministic nonlinear chaos in brain function and borderline psychopathological phenomena. *Med Hypotheses* 1992; 39: 67-72.
5. GOLDBERGER AL, RIGNEY DR, WEST BJ. Chaos and fractals in human physiology. *Sci Am* 1990; 262: 34-41.
6. GARFINKEL A, SPARRO ML, DITTO WL, WEISS JN. Controlling cardiac chaos. *Science* 1992; 257: 1230-1235.
7. GOLDBERGER AL, WEST BJ. Fractals in physiology and medicine. *Yale J Biol Med* 1987; 60: 421-435.