



El caos, al que identificamos con el *Efecto Mariposa*, consiste en una dependencia substancial en las condiciones iniciales. De la misma manera que el aleteo de una mariposa puede hacer caer a derecha o a izquierda unas piedras apiladas de forma inestable, muy pequeños cambios en las condiciones con las que iniciamos nuestros modelos meteorológicos pueden llevar a predicciones meteorológicas dispares.

50 AÑOS DEL EFECTO MARIPOSA

Mark Twainnos relata en el capítulo VIII de su libro *Las aventuras de Tom Sawyer* el método que se le ocurrió a Tom para recuperar una canica que había perdido tras tirarla con ira:

“... Pero se le ocurrió que no era cosa de perder la canica que acababa de tirar, e hizo una paciente rebusca. Pero no pudo encontrarla. Volvió entonces al escondite de tesoros, y colocándose exactamente en la misma postura en que estaba cuando la arrojó sacó otra del bolsillo y la tiró en la misma dirección diciendo:

-Hermana, busca a tu hermana.

Observó donde se detenía y fue al sitio y miró. Pero debió haber caído más cerca o más lejos, y repitió otras dos veces el experimento. La última dio resultado: las dos bolitas estaban a menos de un pie de distancia una de otra.”

Todo el que haya intentado hacer algo similar sabe qué es lo que acostumbra a pasar: o se tiene mucha suerte, o se pierden todas las canicas. ¿Por qué?



Claudio R. Mirasso
Catedrático de Universidad de la Universitat de les Illes Balears (UIB)
Investigador del Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos, IFISC (UIB-CSIC)



Emilio Hernández-García
Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Investigador del Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos, IFISC (UIB-CSIC)

El efecto mariposa es el nombre que se le ha dado al fenómeno por el cual, aunque uno ponga mucho esmero en controlar los detalles de una cierta tarea en el presente, errores muy leves pueden tener consecuencias notables en el futuro. Es lo que experimentó Tom al tener que repetir el lanzamiento de la segunda canica tres veces antes de tener la suerte de que siguiera el mismo camino que la primera. Una de las primeras alusiones explícitas al insecto alado en este contexto podría estar en el relato corto *El ruido de un trueno*, escrito por Ray Bradbury en 1952, en el que unos viajeros en el tiempo descubren al regresar a su época actual que el haber pisado una insignificante mariposa en el pasado les ha cambiado el presente.

Pero el nombre actual de *Efecto mariposa* se lo debemos a los trabajos que desarrolló en los años 60 del siglo pasado el matemático y meteorólogo estadounidense Edward Lorenz. En marzo de 1963, Lorenz publicó su artículo titulado *Deterministic Nonperiodic Flow* (Flujo determinista no-periódico) en la revista científica *Journal of the Atmospheric Sciences*. De esto se cumplen ahora 50 años, un buen momento para repasar las ideas que han dado lugar a la disciplina científica que hoy llamamos *Teoría del caos*.

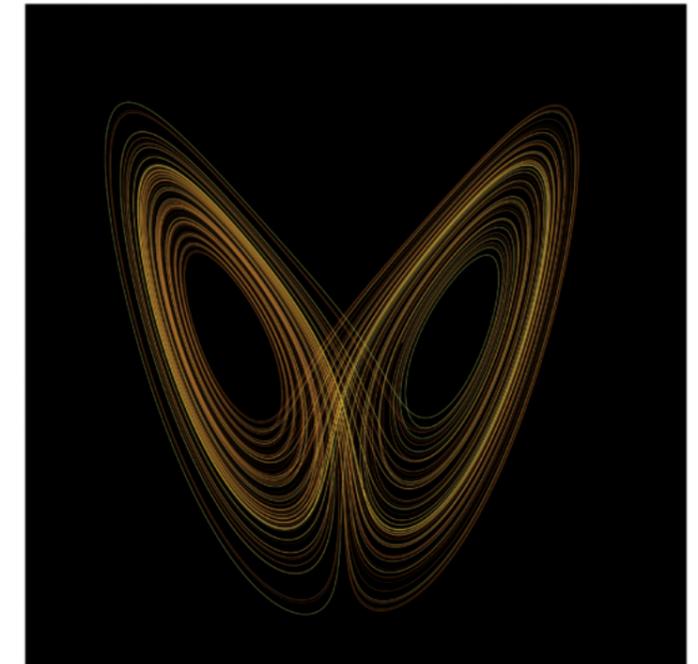
Lorenz describió en su trabajo cómo un conjunto de ecuaciones matemáticas relativamente simples predecían un patrón altamente complejo, que más tarde fue llamado *Atractor de Lorenz*, que representaba las oscilaciones de ciertas variables atmosféricas. Aunque no está explícitamente mencionado en este artículo, para llegar a sus resultados Lorenz se las vio de cara con el *Efecto Mariposa*. Su historia, como muchos de los descubrimientos en la ciencia, había comenzado por azar. Era el año 1961 cuando Lorenz estudiaba, con la ayuda de su ordenador (un Royal Mc Bee LGP-30 con 16Kb de memoria, todo un lujo para la época), el comportamiento atmosférico utilizando un conjunto intrincado de ecuaciones matemáticas.

En cierta ocasión quiso continuar una de sus simulaciones por ordenador donde la había dejado el día anterior, pero aunque

El efecto mariposa es el nombre que se le ha dado al fenómeno por el cual errores muy leves pueden tener consecuencias notables en el futuro

tenía gráficas de sus resultados no tenía guardados los últimos valores numéricos de las variables. Entonces decidió introducir en el ordenador el último de los valores de cada variable que sí tenía, y empezó la simulación numérica a partir de allí. Esta nueva simulación debería llegar a donde llegó la anterior (como en el caso de la segunda canica lanzada por Tom Sawyer) y luego seguir a partir de allí hasta completar los meses de evolución atmosférica que Lorenz quería investigar.

Pero para su sorpresa, el resultado de la nueva simulación daba un escenario atmosférico completamente diferente al que tenía en la gráfica de la simulación anterior. Las soluciones de sus ecuaciones al cabo de un cierto tiempo se separaban entre sí, prediciendo comportamientos atmosféricos muy diferentes. ¿Cómo podía ser eso? Los resultados debían ser iguales porque él había copiado los valores iniciales de la simulación anterior. Bueno... casi. En realidad el valor de una variable que había registrado antes era 0,506127, y para abreviar en la nueva simulación sólo introdujo tres decimales: 0,506. Era una diferencia insignificante en las condiciones ini-



Las ecuaciones matemáticas que Lorenz utilizaba para modelar la atmósfera predicen un comportamiento errático de temperaturas y velocidades atmosféricas. Una representación gráfica de esos vaivenes da lugar al objeto geométrico que a la postre recibió el nombre de *Atractor de Lorenz*.

ciales, pero Lorenz pronto se dio cuenta de que había sido suficiente para cambiar sus predicciones meteorológicas. Esta observación, junto con el hecho de que ocurriera en un modelo matemático puramente determinista, es decir sin ningún tipo de aleatoriedad presente y donde el comportamiento futuro del sistema está plenamente determinado por las ecuaciones matemáticas que lo rigen y las condiciones iniciales, fue la confirmación de la existencia en su modelo de lo que hoy llamamos *caos* y que se caracteriza por una extrema sensibilidad de los resultados a las condiciones iniciales. Este concepto dio lugar en 1972 al famoso título de la conferencia de Lorenz en la 139ª reunión de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia: “¿Puede el aleteo de una mariposa en Brasil producir un tornado en Texas?”. La frase se refiere a que los inofensivos movimientos de una mariposa podrían crear cambios mínimos en la atmósfera que alterarían su dinámica, pudiendo dar lugar a la formación de un tornado (o tal vez evitarlo) muy lejos de donde ella está. Desde entonces el término *Efecto Mariposa* ha entrado en la cultura popular, dando nombre por ejemplo a, por lo menos, cuatro largometrajes y dos grupos musicales.



Edward Lorenz (1917-2008) y el ordenador Royal Mc Bee LGP-30 que usó a en sus estudios a principios de los años 60.

Aunque tardaron un cierto tiempo en alcanzar reconocimiento, las ideas de Lorenz convencieron a la comunidad científica de que las dinámicas caóticas abstractas que los matemáticos llevaban estudiando desde finales del siglo XIX (siendo uno de sus grandes representantes el matemático francés Henri Poincaré), eran relevantes en situaciones físicas reales. Hay que indicar que apreciaciones similares también las hizo simultánea e independientemente el físico japonés Yoshisuke Ueda aunque su director de tesis no se las permitió publicar hasta los años 70. Comportamientos caóticos han sido observados en el laboratorio para sistemas ópticos (por ejemplo utilizando láseres), circuitos elec-

trónicos, reacciones químicas, sistemas fluidos o mecánicos, entre otros. En la naturaleza se observan comportamientos caóticos en las órbitas de los asteroides, en los fenómenos meteorológicos, en el crecimiento de poblaciones ecológicas, en los potenciales de acción de nuestras neuronas o en vibraciones moleculares, entre otros muchos ejemplos. Lo que ocurre en todos estos sistemas es algo parecido a cuando apoyamos un bastón o un paraguas sobre su punta, o apoyamos una piedra grande sobre otra más pequeña y redonda: se trata de un equilibrio muy inestable que durará muy poco tiempo, y la inestabilidad hace que sea muy difícil predecir hacia que lado caerá la piedra.

Aquel descubrimiento que Lorenz realizó en los años 60 extendiera un nuevo campo de conocimiento al que hemos dado a llamar Teoría del Caos

El *Efecto Mariposa* tiene algunas consecuencias obvias: si pequeños errores en nuestras mediciones del presente nos van a llevar a predicciones dispares, será muy difícil, por ejemplo, realizar predicciones meteorológicas fiables, o asegurar que una cierta medida económica va a tener el efecto deseado y no el contrario. Sin embargo, lo que nos enseñan los resultados de Lorenz no es que la predicción sea imposible, sino que para hacerla a un

tiempo más largo necesitamos una gran mejora en nuestro conocimiento de las condiciones presentes. En la actualidad disponemos de redes de estaciones meteorológicas y de abundantes satélites que monitorizan el estado de la atmósfera de una manera impen-

sable en los tiempos de Lorenz, y de ordenadores millones de veces más poderosos. Por eso ahora disponemos de mejores predicciones meteorológicas a varios días vista. El *Efecto Mariposa* nos avisa de que duplicar el rango de validez de estas predicciones exige mucho más esfuerzo que simplemente duplicar el número de estaciones meteorológicas, satélites, la precisión de sus medidas, o la velocidad de los ordenadores.

Pero los científicos no se han limitado a contemplar el *Efecto Mariposa* como un problema y una limitación que dificulta su trabajo. La estrategia "Si no puedes vencer a tu enemigo, únete a él" se aplica

frecuentemente en ciencia y la teoría del caos no es una excepción. En la actualidad, la teoría del caos encuentra importantes aplicaciones en física, ingeniería, biología o economía entre otras ciencias. Por ejemplo, los ingenieros de la NASA utilizan desde hace años las asombrosas propiedades de las órbitas caóticas para dirigir sondas hacia cometas o asteroides prácticamente sin gasto de combustible, simplemente dejando que la astronave siga órbitas auténticamente acrobáticas guiada por la gravedad de la tierra, la luna, el sol u otros planetas, y usando los propulsores solo en el momento de cambiar de una órbita caótica a otra, y para controlar las pequeñas desviaciones que puedan ocurrir. Este es uno de los ejemplos de "control del caos", que también ha sido aplicado en otros sistemas mecánicos, electrónicos y ópticos.

Porque a principio de los años 90 los científicos norteamericanos Louis Pecora y Thomas Carroll demostraron que, aunque parezca anti-intuitivo, dos sistemas caóticos podían sincronizarse. Es decir se les podía obligar a hacer lo mismo y al mismo tiempo si se los conectaba adecuadamente entre sí. Lo que hace uno de ellos es caótico, pero sus impredecibles vaivenes pueden ser 'leídos' o 'copiados' por un segundo sistema, abriendo así una puerta al uso del caos para telecomunicaciones. Por ejemplo, un láser de semiconductor similar a los que se utilizan en las comunicaciones ópticas, cuando opera en un régimen caótico emite una luz cuya intensidad varía de forma errática a frecuencias de miles de millones de veces por segundo. Lejos de dar por inútil tal dispositivo por comportarse de manera tan compleja e impredecible, su luz puede ser utilizada para transmitir información en forma encriptada a través de las redes de comunicación óptica, como las redes de fibra óptica que utilizan las empresas de telefonía. La luz caótica sirve como portadora de un mensaje oculto que solo es posible descifrar con un receptor que sea prácticamente una copia del emisor y que también opere en un estado caótico. En el 2005, uno de los autores de este artículo participó en el primer experimento de transmisión de información encriptada utilizando láseres de semiconductor operando en un régimen caótico, realizado en la red de comunicaciones metropolitana de la ciudad de Atenas. Se transmitieron y se recuperaron datos a velocidades de

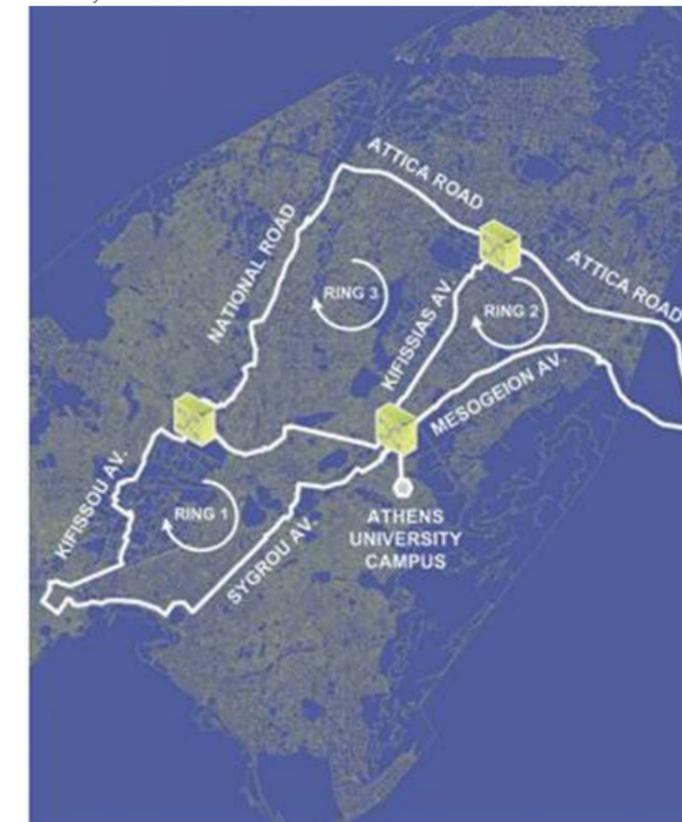
Gigabits por segundo y con una tasa de error muy baja. Los resultados de este experimento fueron publicados en la prestigiosa revista *Nature*.

La complejidad e impredecibilidad de los comportamientos caóticos también se manifiestan en el movimiento de partículas en el océano y en la atmósfera. Todos recordamos,

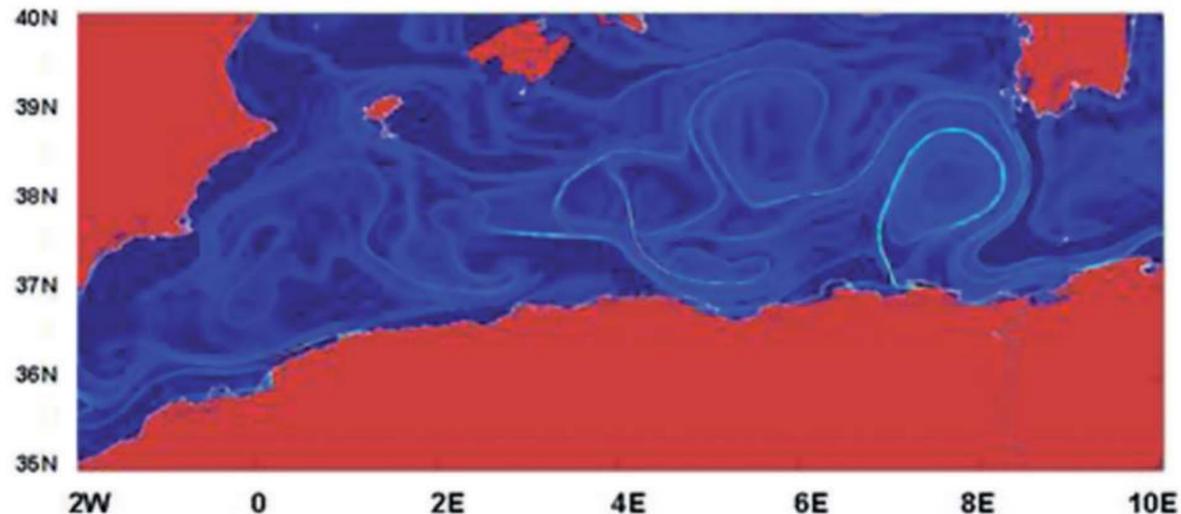
Se observan comportamientos caóticos en las órbitas de los asteroides, en los fenómenos meteorológicos, en el crecimiento de poblaciones ecológicas, en los potenciales de acción de nuestras neuronas o en vibraciones moleculares, entre otros muchos ejemplos

por ejemplo, los enormes problemas que produjeron al tráfico aéreo las cenizas del volcán islandés Eyjafjallajökull en abril del 2010. En el caso de partículas transportadas por las corrientes marinas se ha estudiado en detalle en qué zonas las trayectorias son más predecibles, y en cuáles las trayectorias cercanas se separan rápido dificultando la predicción de su futuro. Ocurre que estas últimas zonas forman líneas

El caos ha encontrado un hueco en el mundo de las aplicaciones, una de las más importantes la transmisión de información encriptada. El experimento realizado en la red de comunicaciones metropolitana de la ciudad de Atenas confirmó las predicciones teóricas y los estudios de laboratorios.



1 April 1997



Un ejemplo de configuración de las líneas en la superficie del Mediterráneo donde el Efecto Mariposa, es decir la impredecibilidad de las trayectorias, es máxima. Estas líneas delimitan masas de agua diferentes, y su estudio nos permite determinar hacia donde se dirigen esas masas de agua.

sobre el océano, y precisamente actúan de fronteras entre aguas de diversos orígenes. De esta manera, el análisis de cuán caótico es el movimiento del mar nos da una herramienta para determinar con exquisito detalle hacia donde se dirigen diversas masas de agua, una manera interesante de darle la vuelta al Efecto Mariposa. Esta metodología se está aplicando con éxito para determinar la trayectoria de vertidos de petróleo.

Pero las aplicaciones del caos no acaban aquí. Constantemente surgen nuevas y fascinantes propuestas. Entre las más recientes se encuentra la generación de números aleatorios. Los generadores de números y secuencias aleatorias, es decir sin un patrón que se repita, son componentes esenciales en los sistemas de procesamiento de información tanto actuales como futuros. Juegan un papel fundamental en sistemas de encriptación de datos, autenticación de información, por ejemplo en transacciones electrónicas, o en los juegos online.

En la actualidad, los generadores de números aleatorios más utilizados están basados en algoritmos matemáticos que muchas veces no tienen la velocidad que se requiere de ellos. Alta velocidad y aleatoriedad pueden ser esenciales en algunas aplicaciones. Y la generación de números aleatorios usando láseres de semiconductor, aquellos que dijimos se utilizan en las comunicaciones ópticas, se está abriendo paso debido a su relativa facilidad de implementación pero sobre todo por su tremenda velocidad, que ya supera los 1.000 millones de números por segundo.

En resumen, el azar hizo que aquel descubrimiento que Lorenz realizó en los años 60 extendiera un nuevo campo de conocimiento al que hemos dado a llamar *Teoría del Caos*. Ahora entendemos mejor cómo y qué ocurre, somos capaces de controlarlo en ciertas circunstancias e incluso hemos aprendido a aprovecharnos de él para ciertas aplicaciones. Pero la teoría del caos no está cerrada. Aun tenemos un largo camino que recorrer lleno de nuevos retos y fascinantes aplicaciones.

¿TE IMAGINAS ESCRIBIR EN PRIMERA PERSONA TU PROPIA HISTORIA?

- Paso 1 Descubrir *el libro* en el que ya está escrita la historia de "mi" vida.
- Paso 2 Aceptar ser el guionista y redactor jefe de una *nueva edición*.
- Paso 3 Asumir el papel de auténtico protagonista principal.
- Paso 4 Decidirse por empezar a introducir cambios en los capítulos reservados a *la novela familiar*.



José García Peñalver
Psicólogo Clínico-Psicoanalista

☎ 871 948 901
josegarcia@psicoanalisispalma.com
www.psicoanalisispalma.com

EL PSICOANÁLISIS
PUEDE AYUDARLE



Nuestro servicio, la mejor garantía

C/. D'Alexandre de Laborde, 26. Pol. Ind. Cas Enagistes · 07011 Palma de Mallorca
Tel. 971 75 10 46 / 971 76 46 46 · Fax 971 75 99 16
E-mail: easa@electronica-arias.es · <http://www.electronica-arias.es>

INSTALACIONES Y MONTAJES ELÉCTRICOS / DOMÓTICA / AUTOMATISMOS
ILUMINACIÓN / CLIMATIZACIÓN / CABLEADO ESTRUCTURADO



Alimentación biológica y
Suplementos naturales

El Equilibrio de nuestro cuerpo
y nuestra salud empieza con
lo que comemos.

Biodespensa:
Biológico, Ecológico
y Natural



C/. Andrea Doria, 50 - Palma de Mallorca
(Ctra. a Son Dureta-Génova. Frente a gasolinera)
Esquina Avda. Picasso
biodespensa@biodespensa.e.telefonica.net

971 458 200