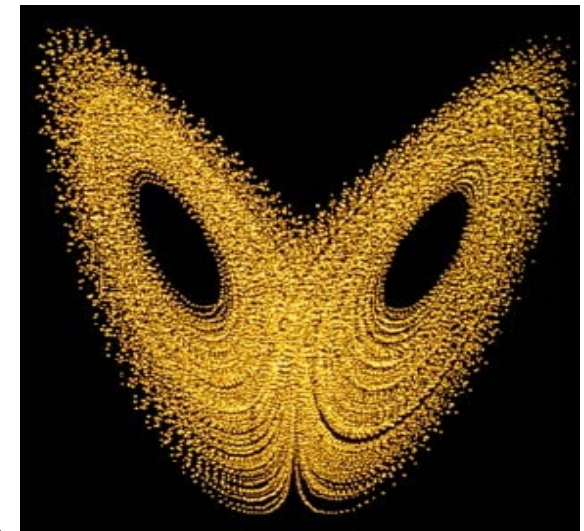


Caos

Un nuevo paradigma científico

Rafael Molina

Instituto de Estructura de la Materia - CSIC



Semana de la Ciencia, 15 de noviembre de 2013

Antes que todas las cosas fue **Caos**

Teogonía, Hesiodo s. VIII-VII a.c.

Antes que todas las cosas fue **Caos**

Teogonía, Hesiodo s. VIII-VII a.c.

Caos.

(Del lat. chaos, y este del gr. χάος, abertura).

1. m. Estado amorfo e indefinido que se supone anterior a la ordenación del cosmos.

2. m. Confusión, desorden.



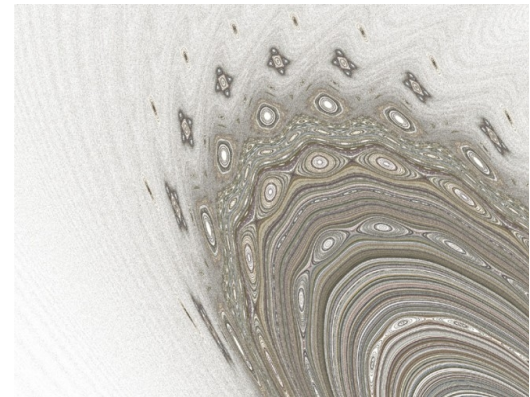
Antes que todas las cosas fue **Caos**

Teogonía, Hesiodo s. VIII-VII a.c.

Caos.

(Del lat. chaos, y este del gr. χάος, abertura).

3. m. Fís. y Mat. Comportamiento aparentemente errático e impredecible de algunos sistemas dinámicos, aunque su formulación matemática sea en principio determinista.





Péndulo y péndulo doble

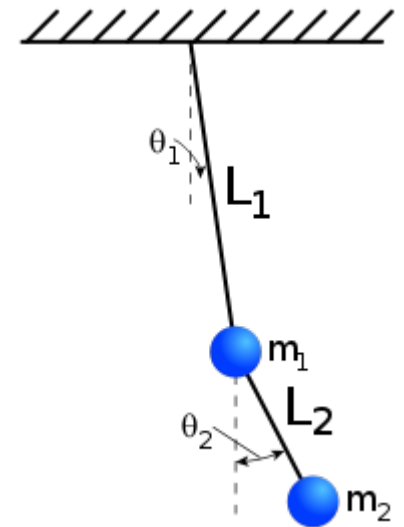
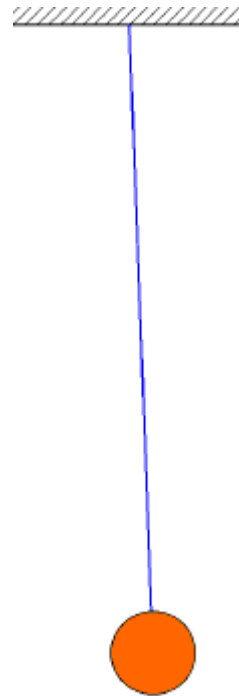


Péndulo y péndulo doble





Péndulo y péndulo doble



- La realidad nos aparece como una mezcla sorprendente de **orden** y **caos**.

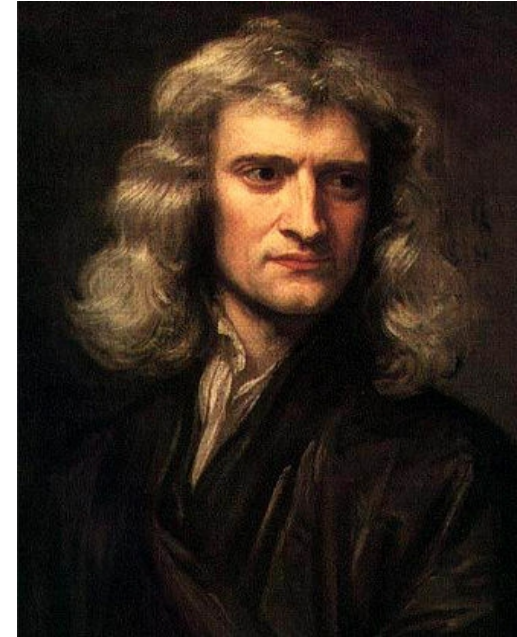
- El orden es más aparente en el movimiento periódico de los astros en el cielo.

Leyes de Newton

Tres leyes de la mecánica

- Ley de la inercia.
- Ley de la fuerza $F = ma$.
- Ley de acción y reacción.

Ley de la gravitación universal



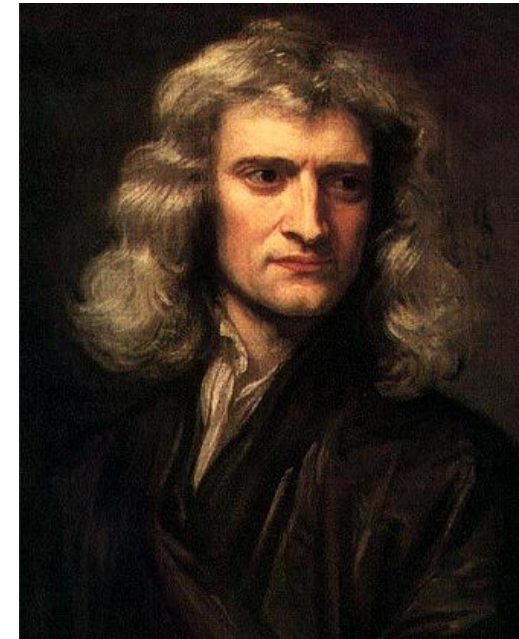
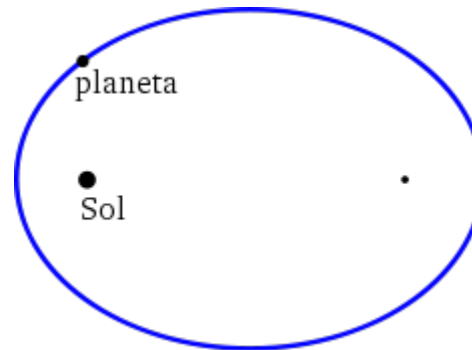
Sir Isaac Newton (1642-1727)

Leyes de Newton

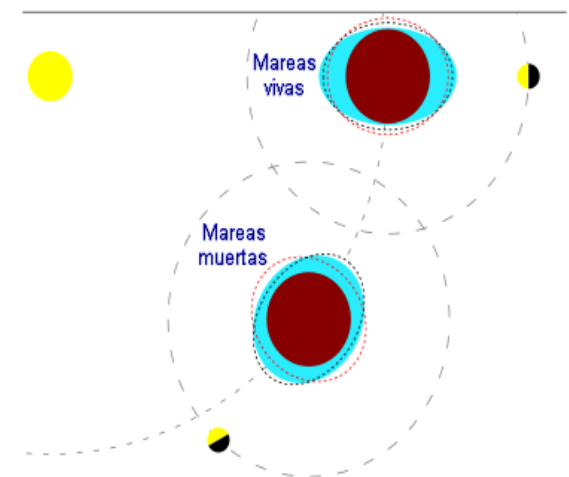
Tres leyes de la mecánica

- Ley de la inercia.
- Ley de la fuerza $F = ma$.
- Ley de acción y reacción.

Ley de la gravitación universal



Sir Isaac Newton (1642-1727)



Determinismo

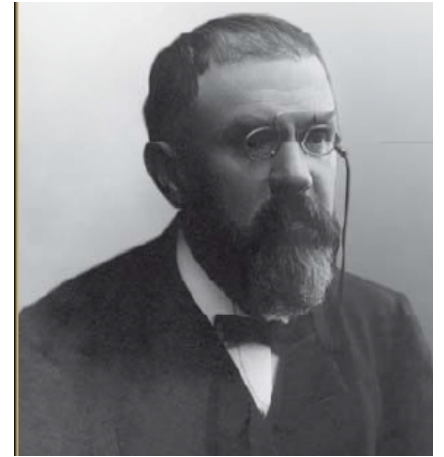
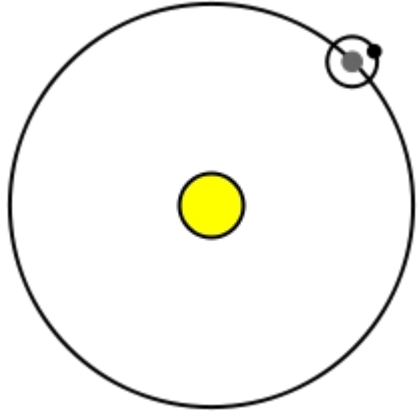


Laplace (1749-1827)

Podemos interpretar el estado actual del universo como el efecto del pasado y la causa de su futuro. Un intelecto que en un cierto momento conociera todas las fuerzas que ponen a la naturaleza en movimiento, y todas las posiciones de las que la naturaleza está compuesta, si ese intelecto fuera suficientemente vasto para analizar esos datos, podría incluir en una única fórmula el movimiento de los grandes cuerpos del universo y los del átomo más pequeño; para un tal intelecto nada sería incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes frente a sus ojos.

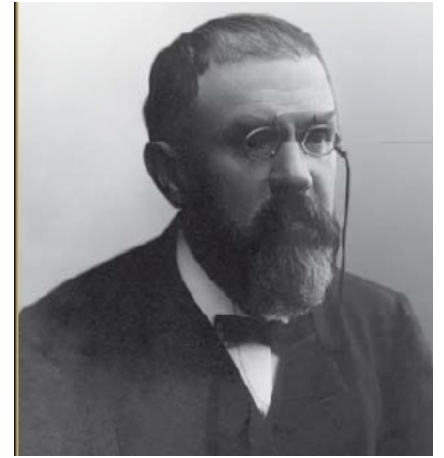
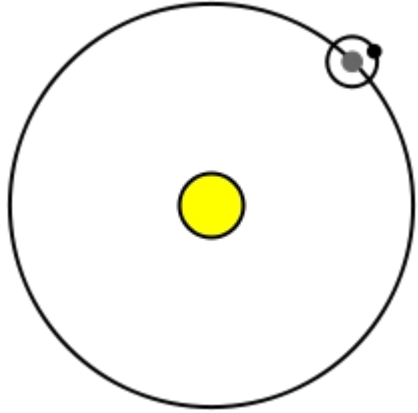
*Pierre Simon de Laplace,
Un ensayo filosófico sobre las probabilidades (1814)*

Problema de los tres cuerpos



Henri Poincaré
(1854-1912)

Problema de los tres cuerpos



Henri Poincaré
(1854-1912)

Si conociésemos exactamente las leyes de la naturaleza y la situación del Universo en el instante inicial, podríamos predecir con exactitud la situación del Universo en un instante ulterior. Pero aun cuando las leyes naturales no guardaran más secretos para nosotros, no podemos conocer la situación inicial más que aproximadamente. Si esto nos permite predecir la situación ulterior con la misma aproximación, que es todo lo que necesitamos, decimos que el fenómeno ha sido predicho, [...]. Pero no acaece siempre así: puede suceder que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan algunas muy grandes en los fenómenos finales. Un pequeño error al inicio engendrará un error enorme al final. La predicción se vuelve Imposible.

Henri Poincaré
Ciencia y Método (1908)

Sistemas lineales vs. no lineales

- Sistemas lineales

Efectos proporcionales a las causas.

Distintas causas se unen de forma sencilla para producir un efecto combinado.

Sistemas lineales vs. no lineales

- Sistemas lineales

Efectos proporcionales a las causas.

Distintas causas se unen de forma sencilla para producir un efecto combinado.

- Sistemas no lineales

Efectos no proporcionales a las causas.

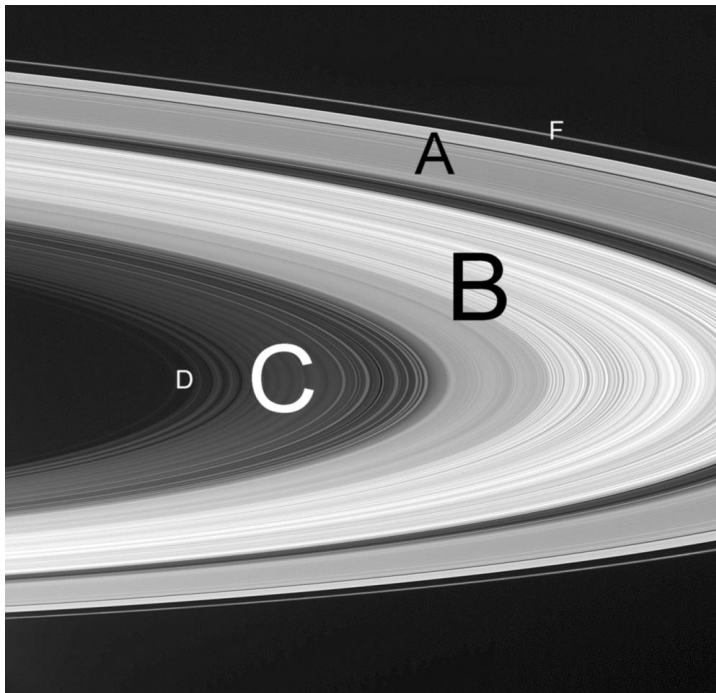
No se puede deducir los efectos combinados de distintas causas conociendo el efecto de cada causa por separado.

Teorema KAM

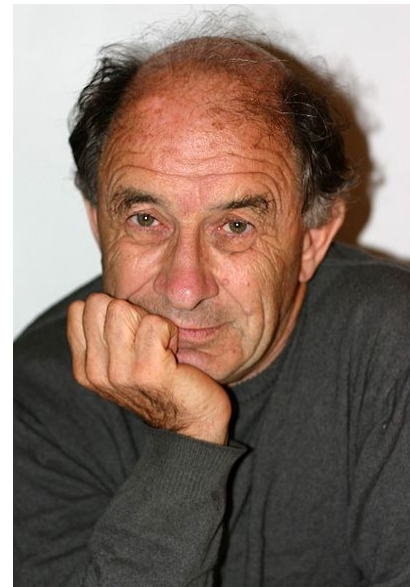
Las órbitas regulares de un sistema sometido a una perturbación se pierden poco a poco conforme aumenta la intensidad de la perturbación.



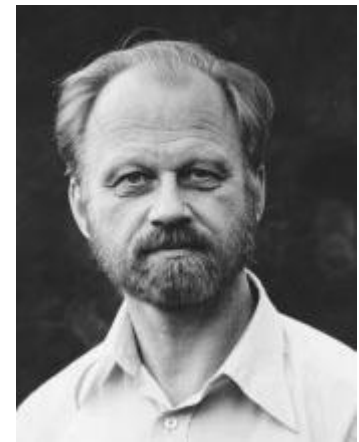
Andrey Kolmogorov
(1903-1987)



Anillos de Saturno (Fotografía del Voyager)



Vladimir Arnold
(1937-2010)



Jürgen Moser
(1927-1999)

¿Qué cambió en los años 60?

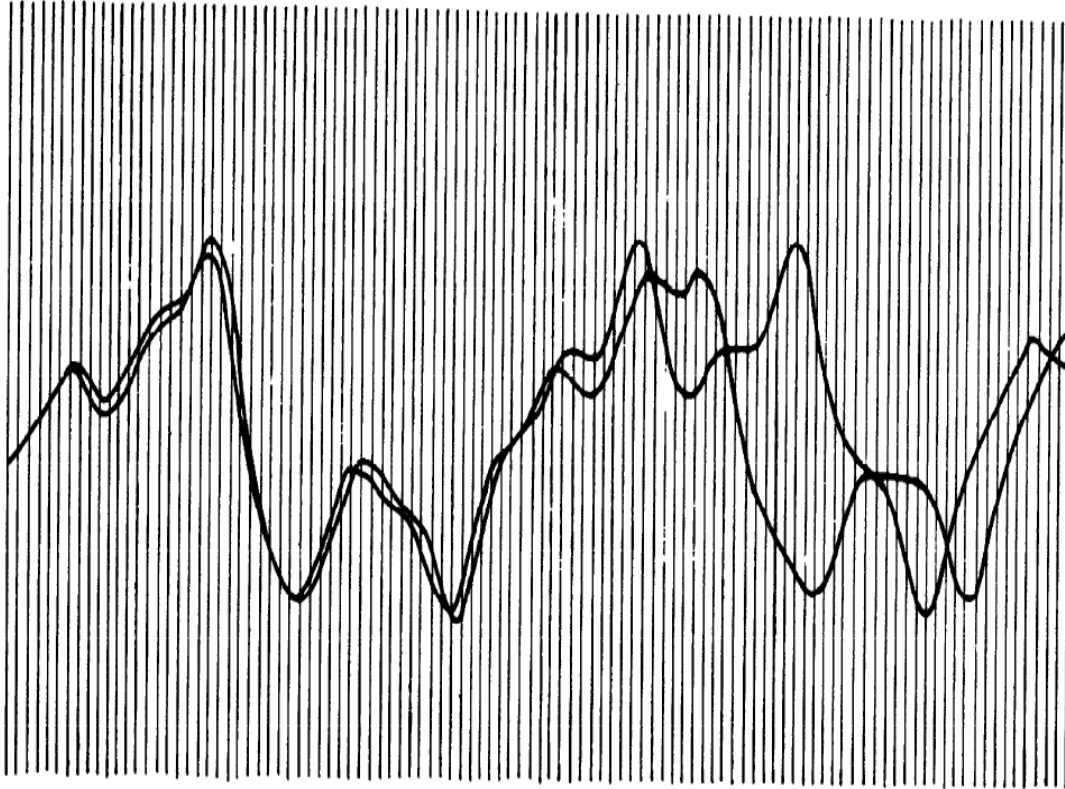
¿Qué cambió en los años 60?



El efecto mariposa

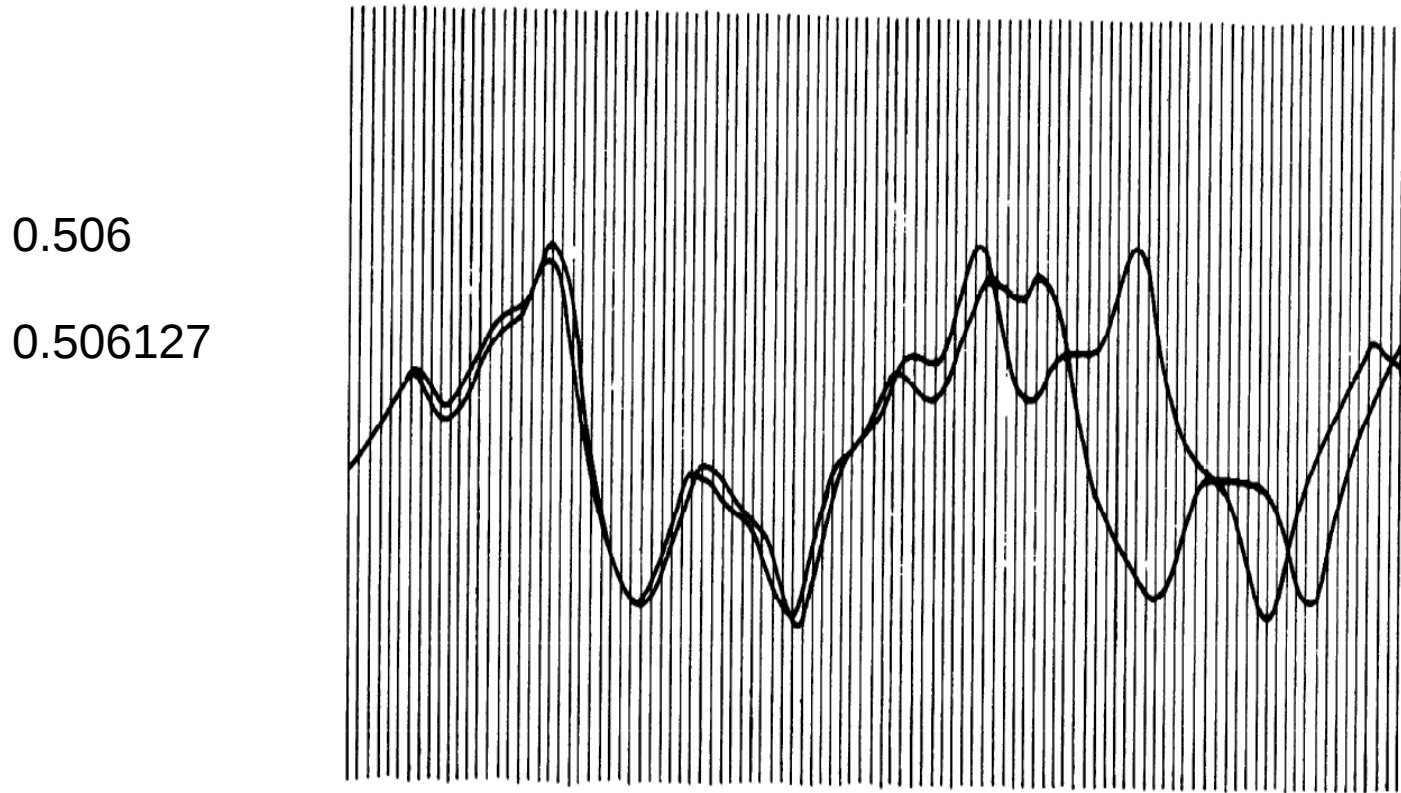
0.506

0.506127



Edward Norton Lorentz 1917-2008

El efecto mariposa

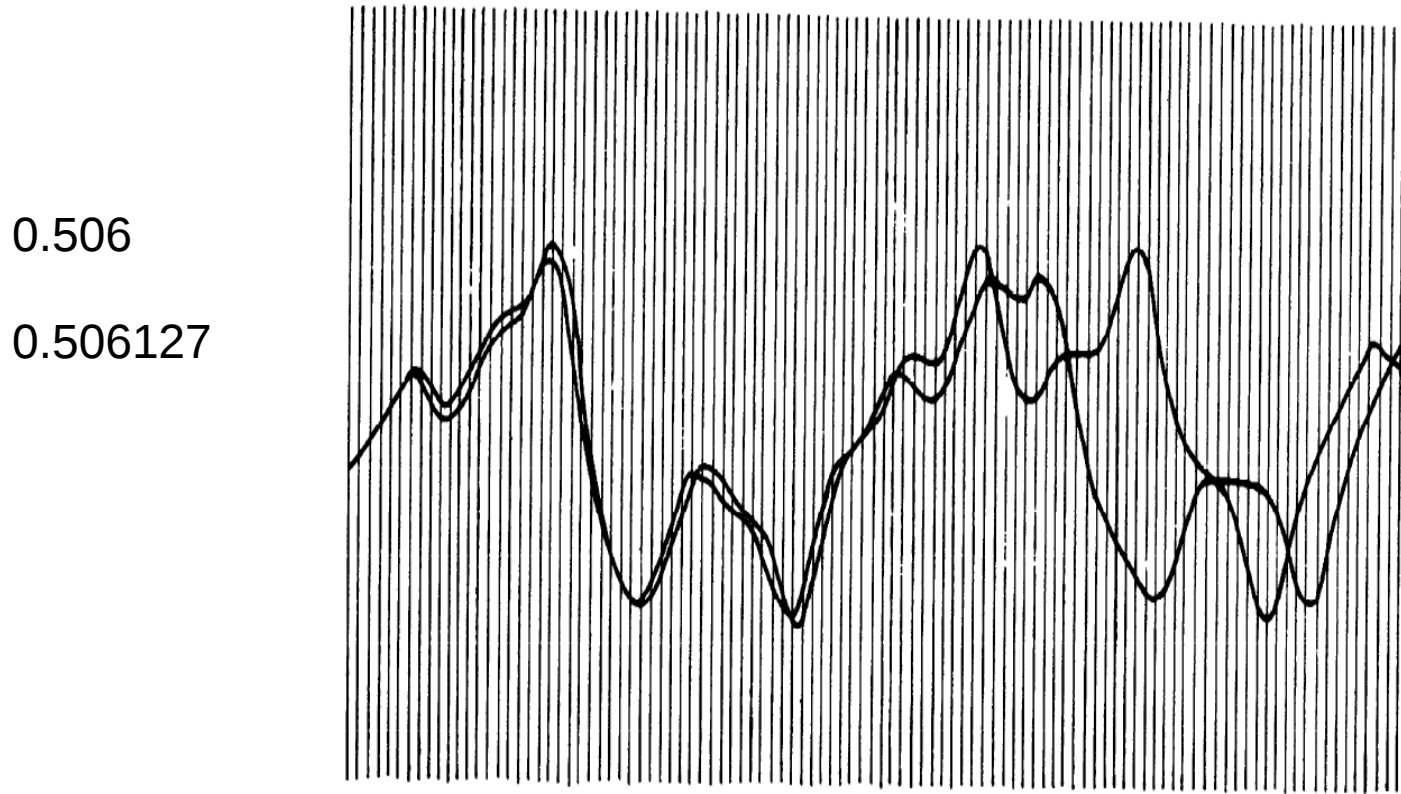


Edward Norton Lorenz 1917-2008

Extrema sensibilidad a las condiciones iniciales.

Los sistemas caóticos se vuelven impredecibles a partir de un cierto tiempo.

El efecto mariposa



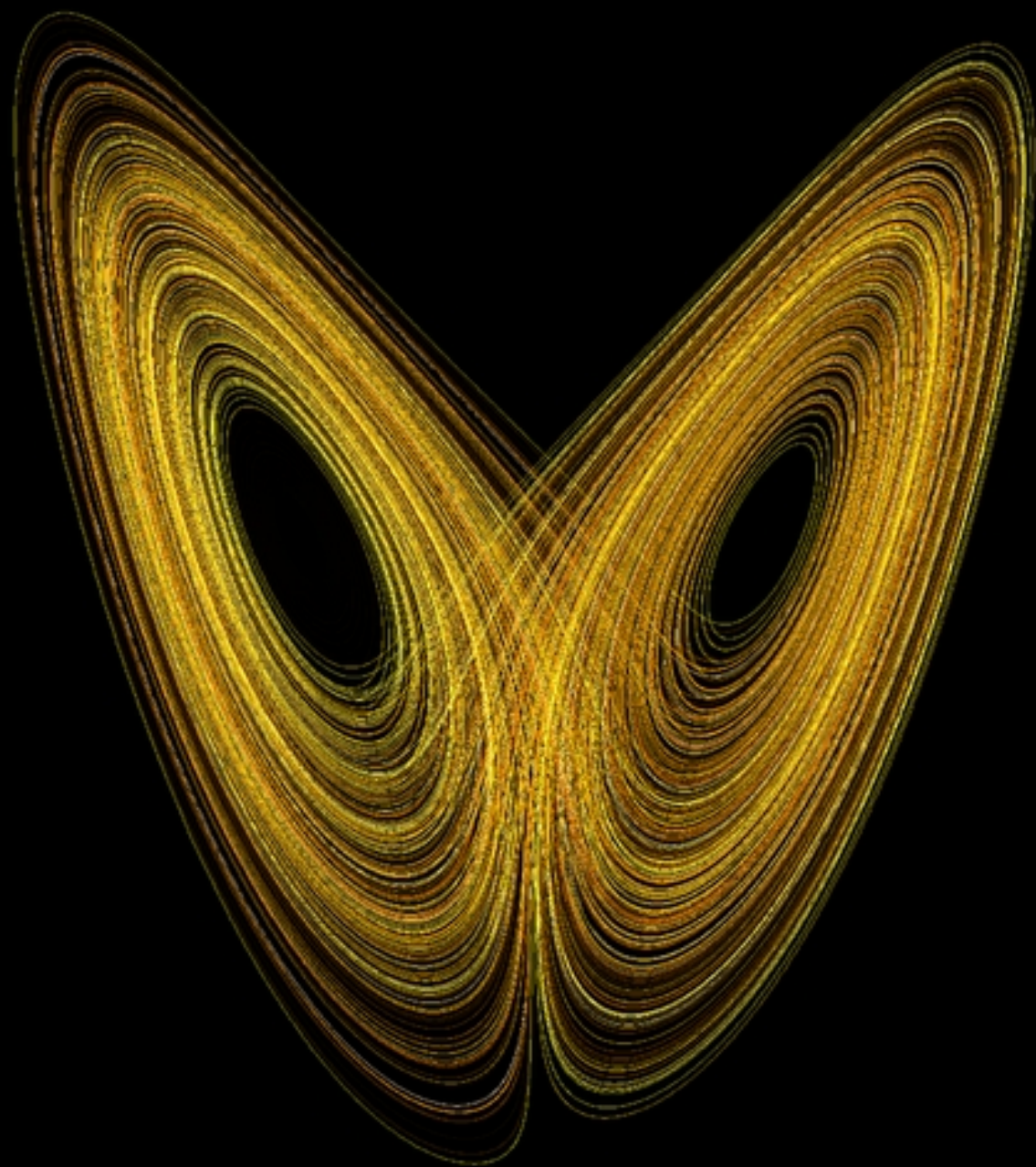
Edward Norton Lorenz 1917-2008

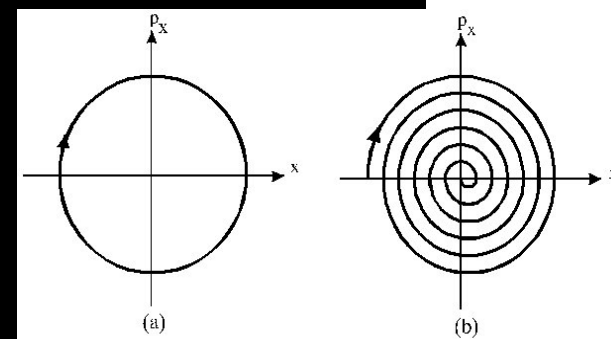
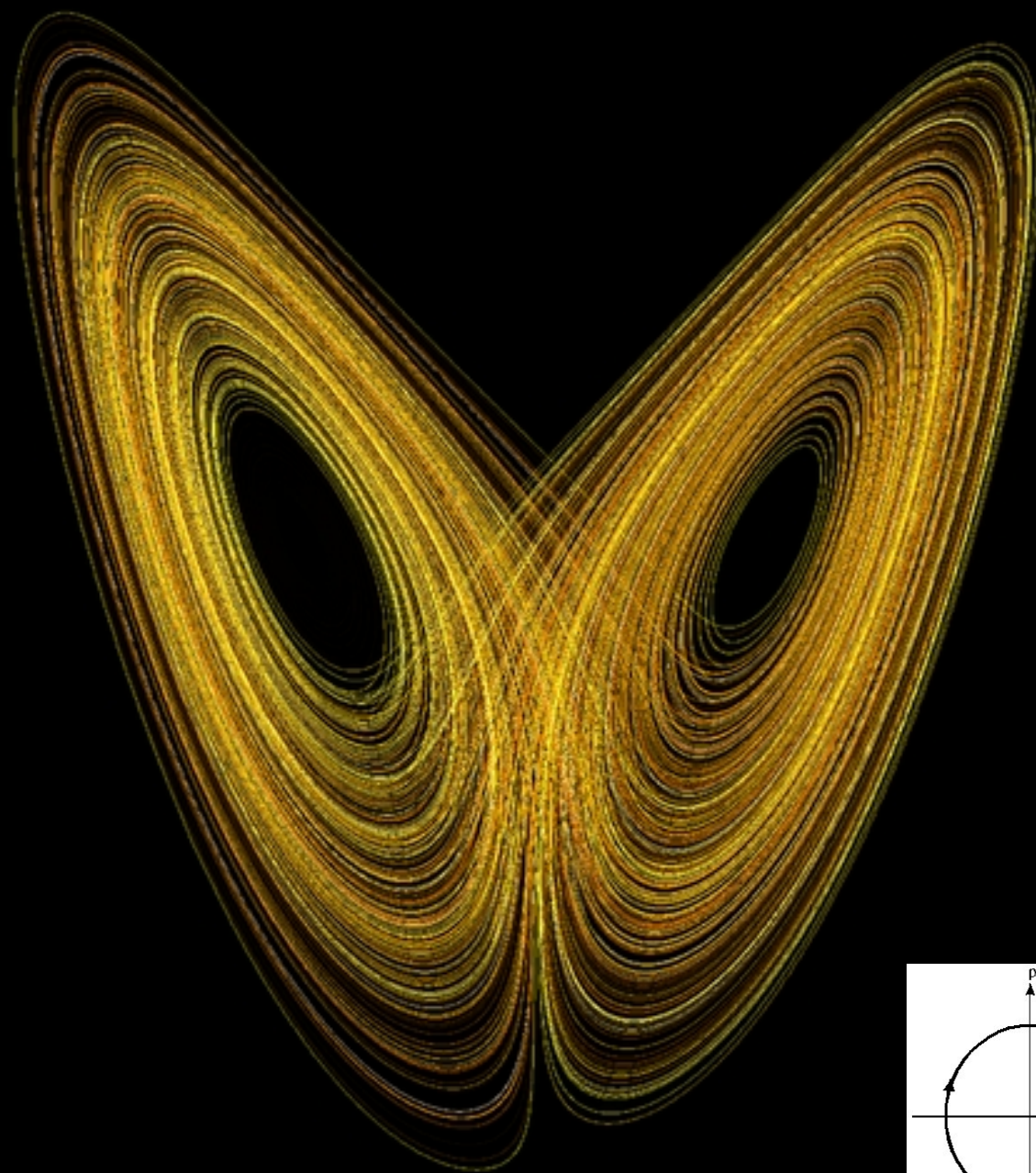
1963-2013
50 años de caos

Extrema sensibilidad a las condiciones iniciales.

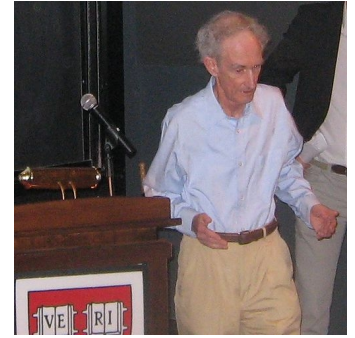
Los sistemas caóticos se vuelven impredecibles a partir de un cierto tiempo.

¿Puede una mariposa aleteando en Brasil provocar un tornado en Texas?





Mapa logístico

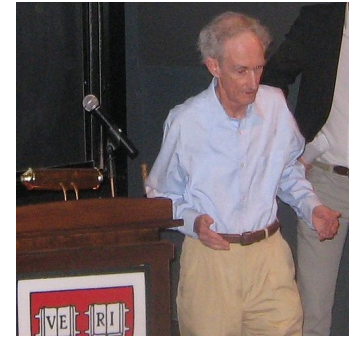


Bob May (1938 -

Población año siguiente = ritmo de crecimiento x Población actual x (1 – Población actual)

1 = Población máxima que admite el ecosistema

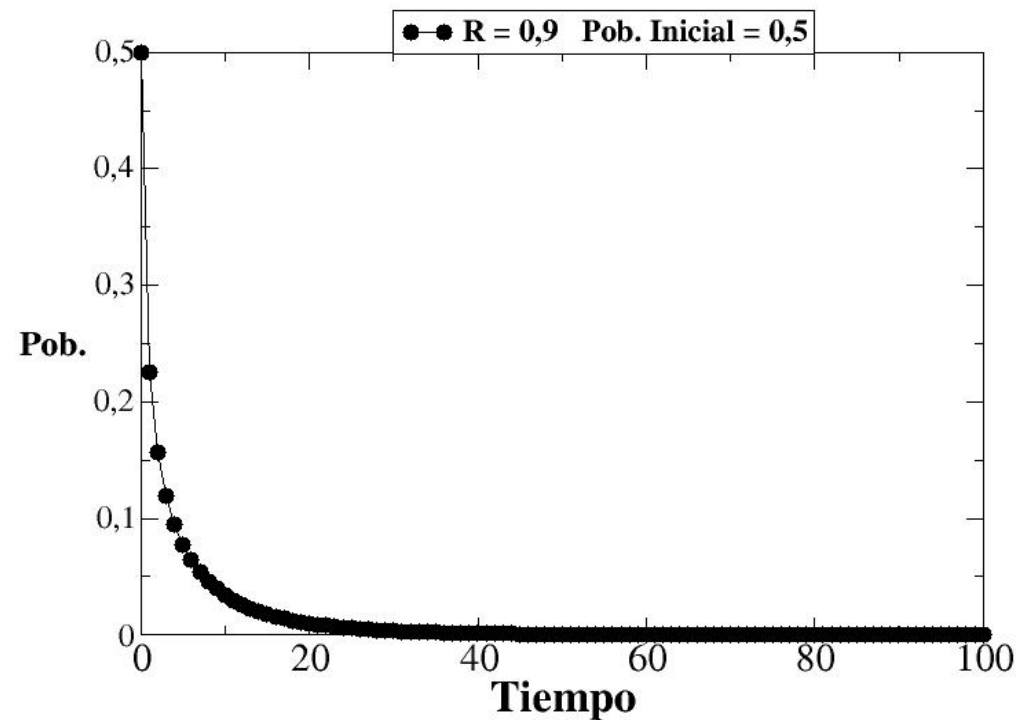
Mapa logístico



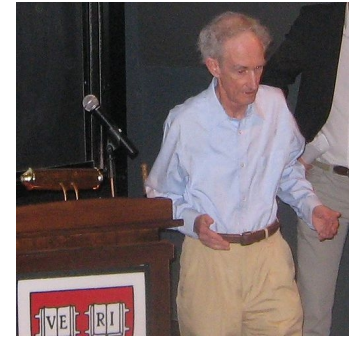
Bob May (1938 -

Población año siguiente = ritmo de crecimiento $\times$ Población actual $\times$ (1 – Población actual)

1 = Población máxima que admite el ecosistema



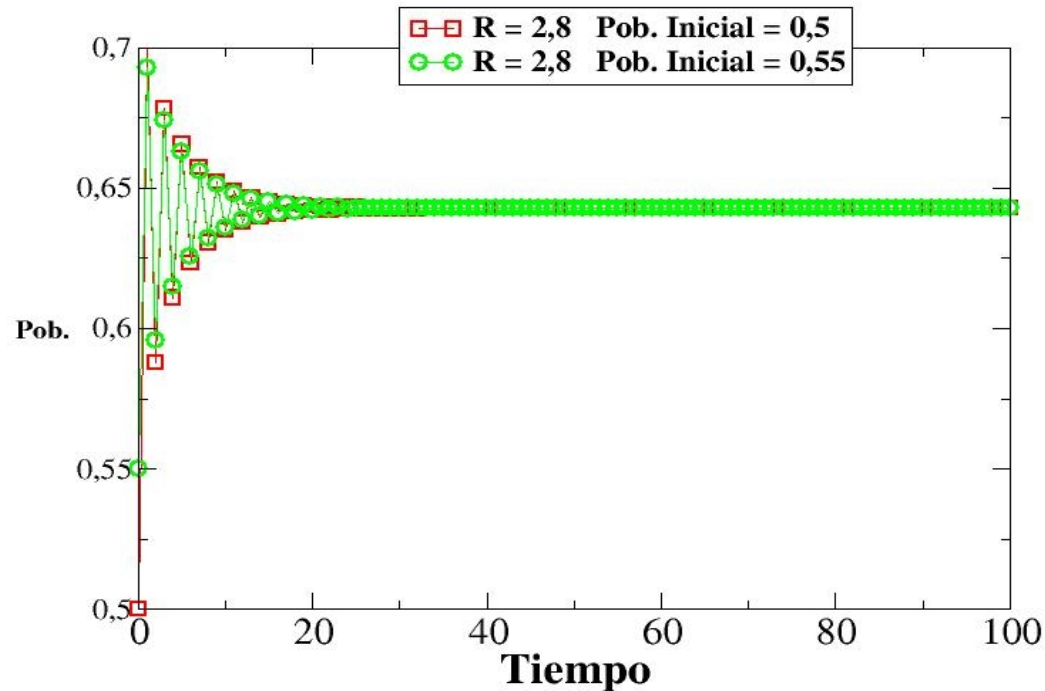
Mapa logístico



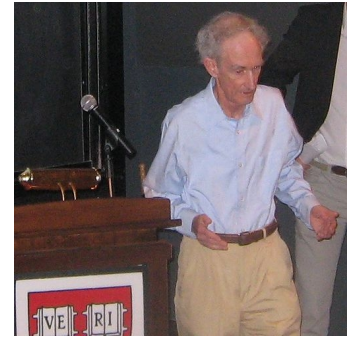
Bob May (1938 -

Población año siguiente = ritmo de crecimiento $\times$ Población actual $\times$ (1 – Población actual)

1 = Población máxima que admite el ecosistema



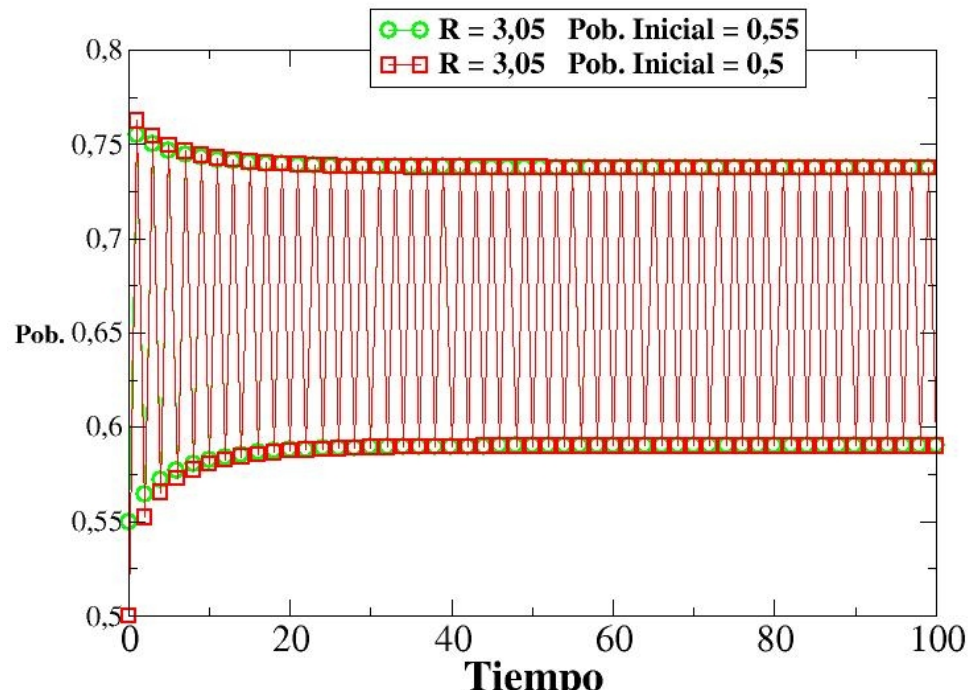
Mapa logístico



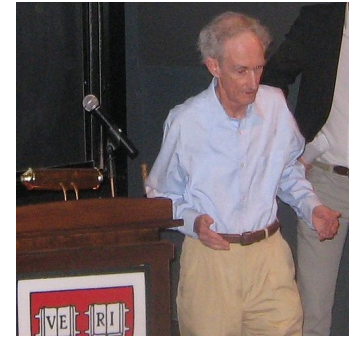
Bob May (1938 -

Población año siguiente = ritmo de crecimiento $\times$ Población actual $\times$ ($1 -$ Población actual)

1 = Población máxima que admite el ecosistema



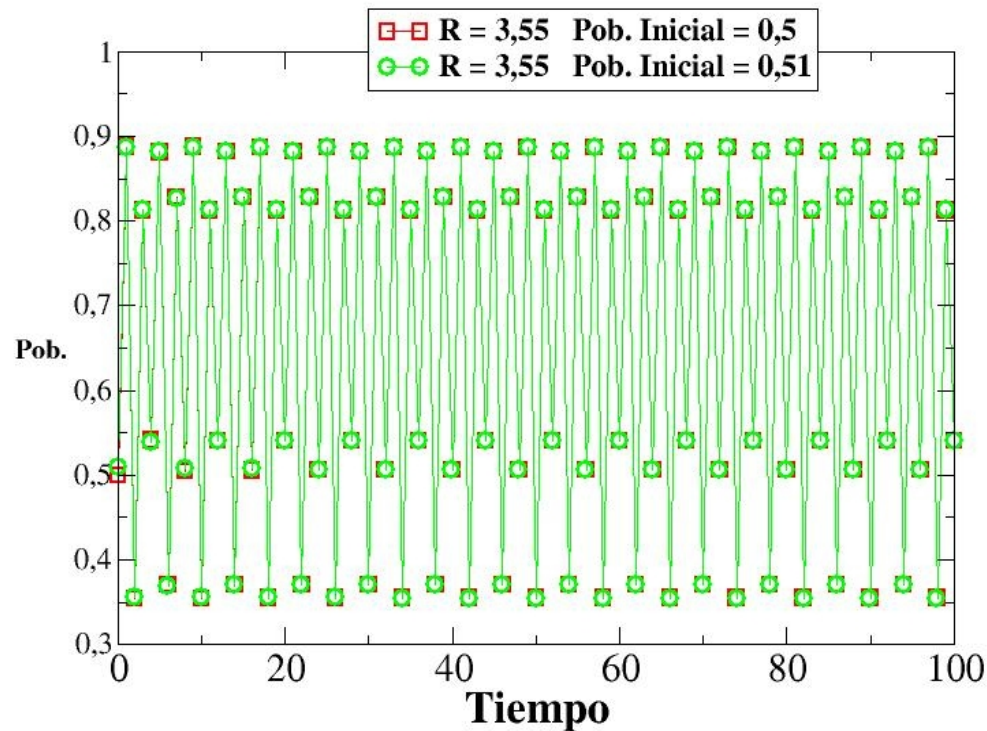
Mapa logístico



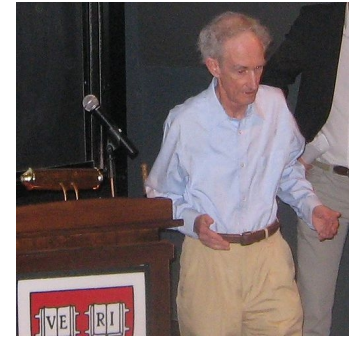
Bob May (1938 -

Población año siguiente = ritmo de crecimiento $\times$ Población actual $\times$ (1 – Población actual)

1 = Población máxima que admite el ecosistema



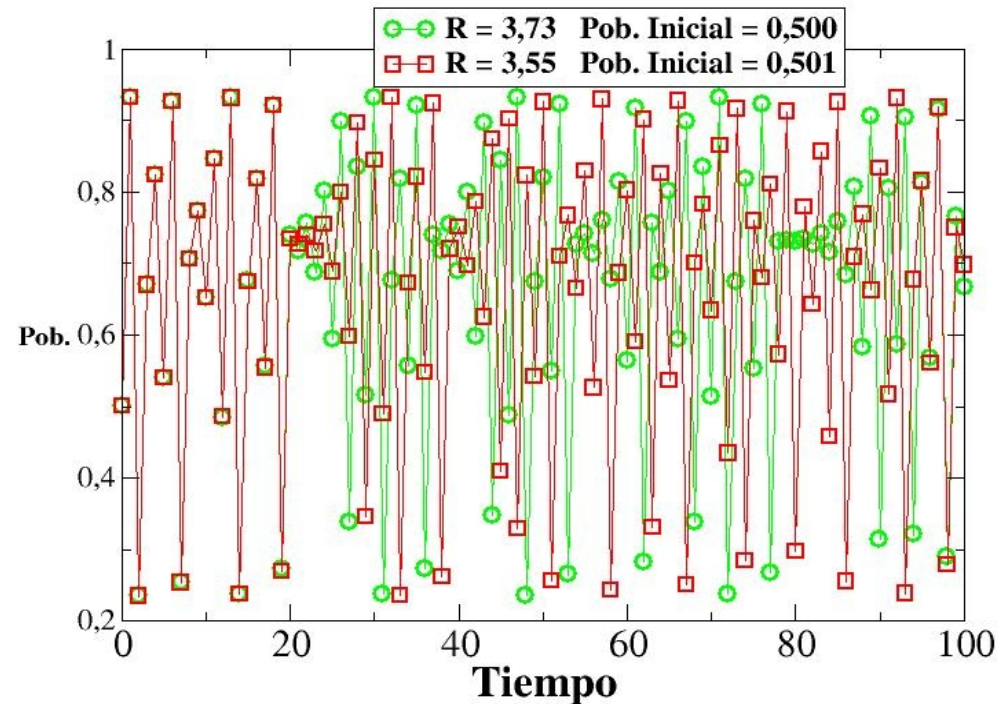
Mapa logístico

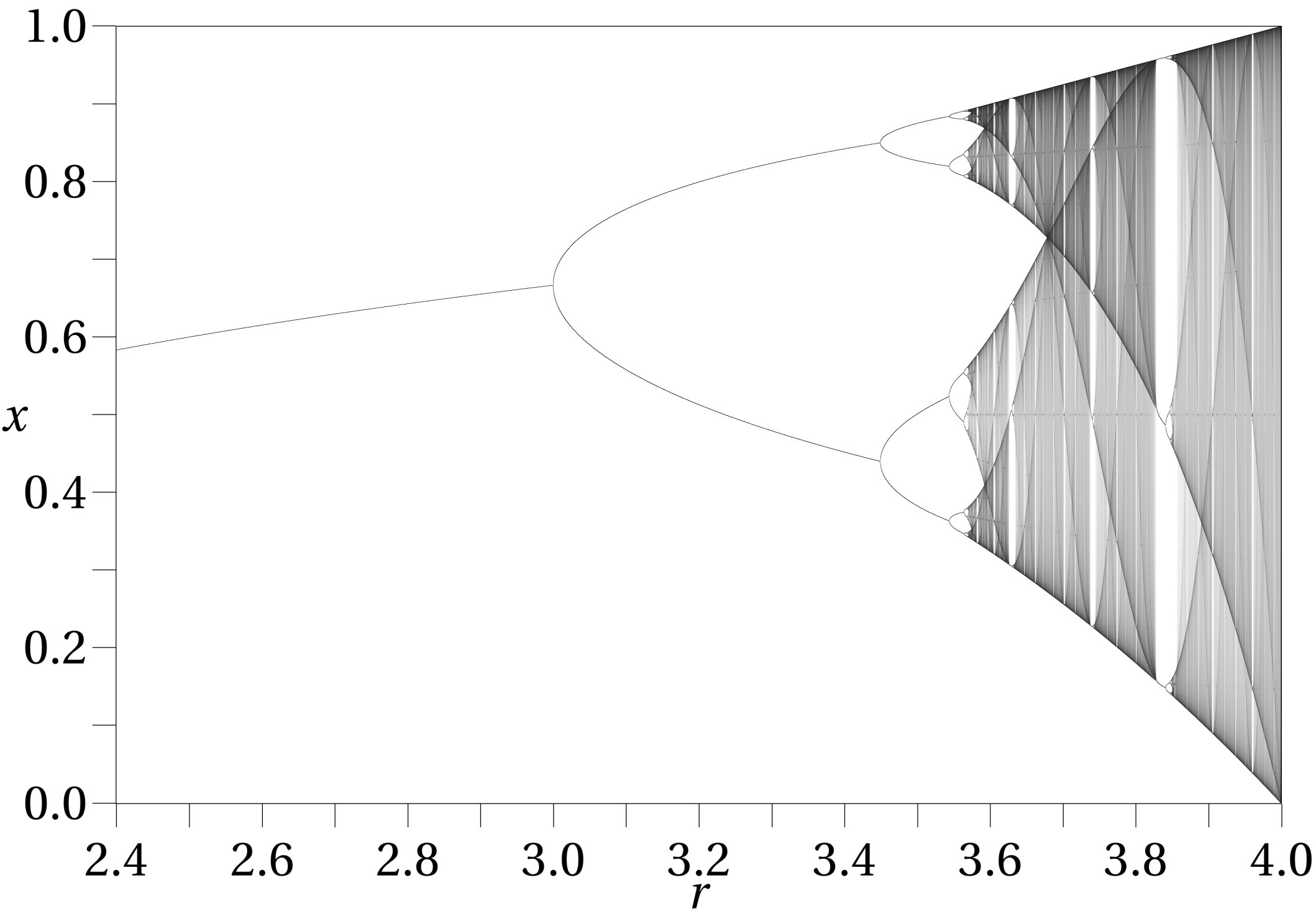


Bob May (1938 -

Población año siguiente = ritmo de crecimiento $\times$ Población actual $\times$ (1 – Población actual)

1 = Población máxima que admite el ecosistema



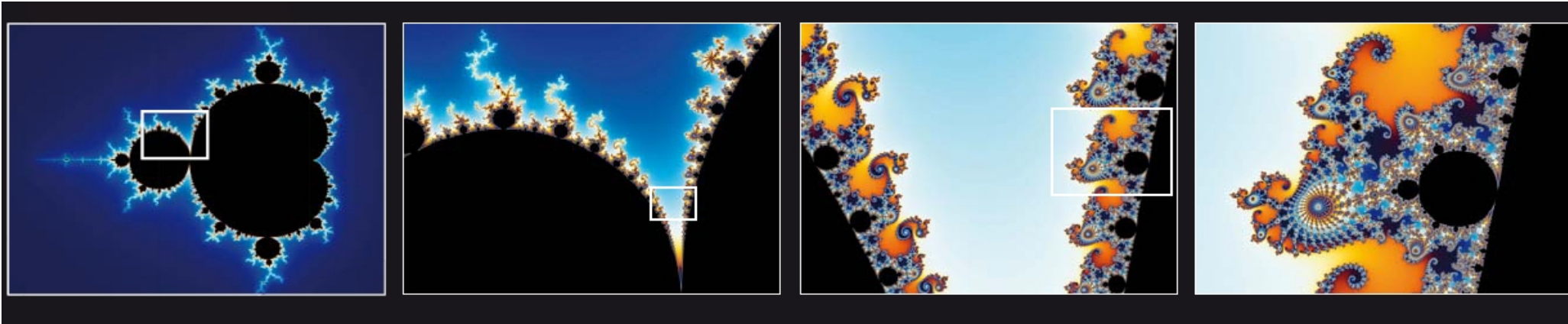


Fractales

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + C$$



Benoît Mandelbrot (1928-2010)



Fractales



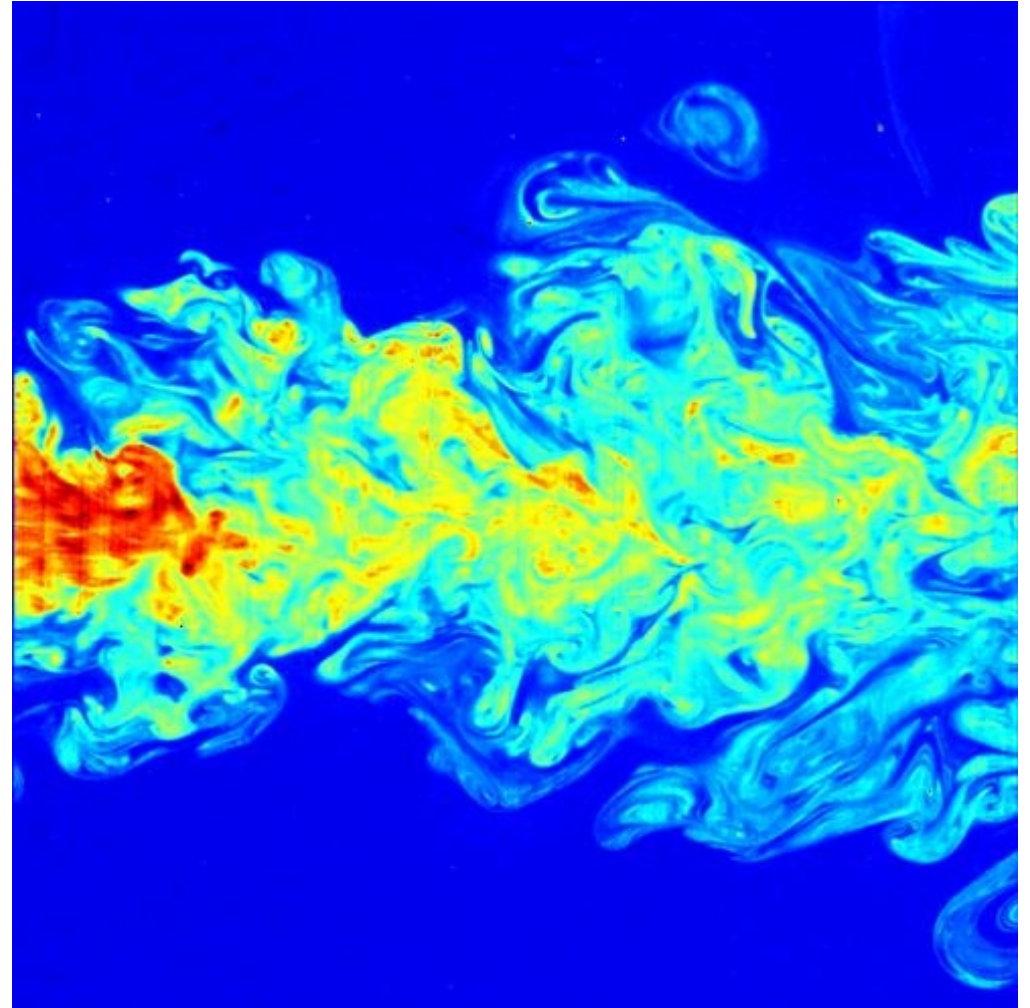
Benoît Mandelbrot (1928-2010)



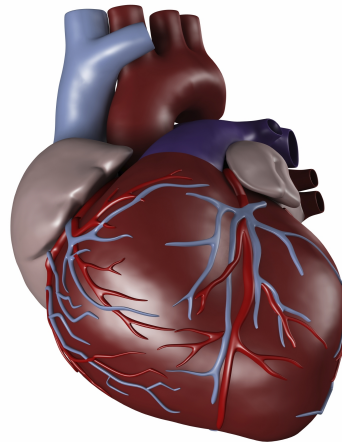
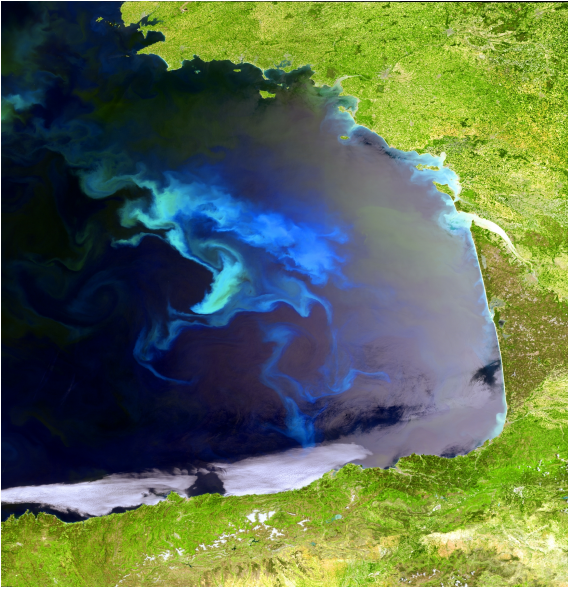
Turbulencia: una frontera para la ciencia



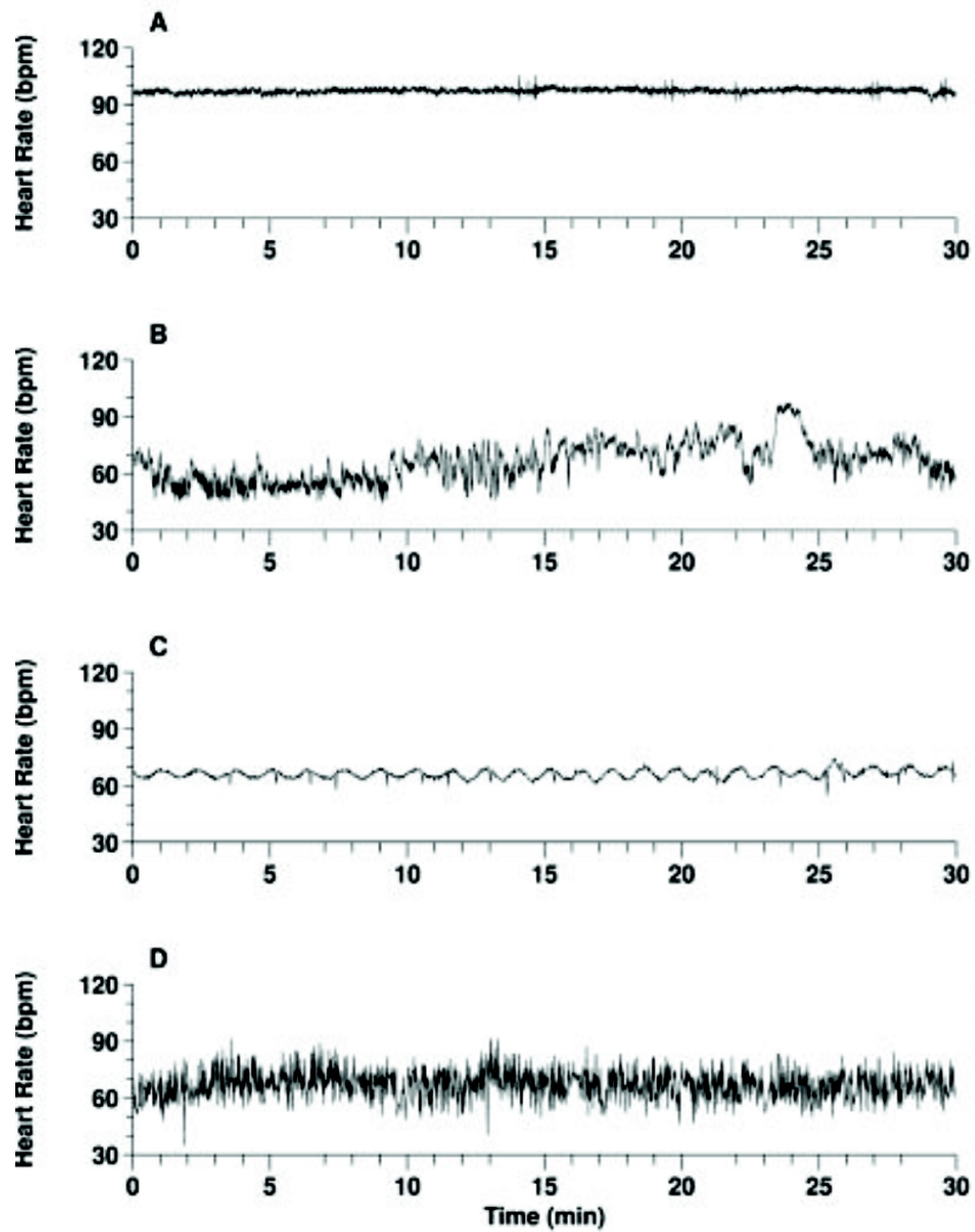
Turbulencia: una frontera para la ciencia



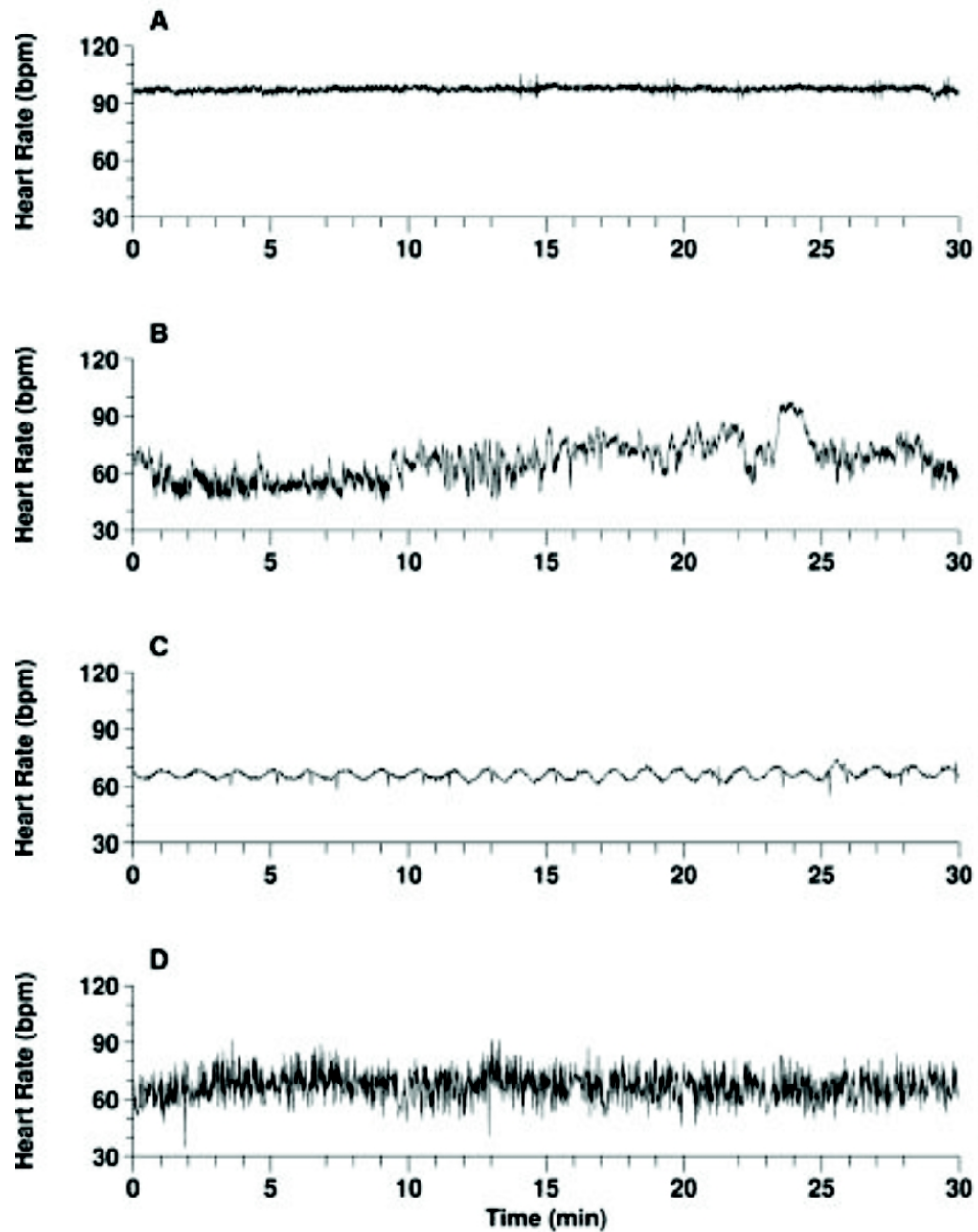
El caos aparece en muchos sitios



Heart Rate Dynamics in Health and Disease: A Time Series Test



**Heart Rate Dynamics in Health and Disease:
A Time Series Test**



Insuficiencia cardiaca

Corazón sano

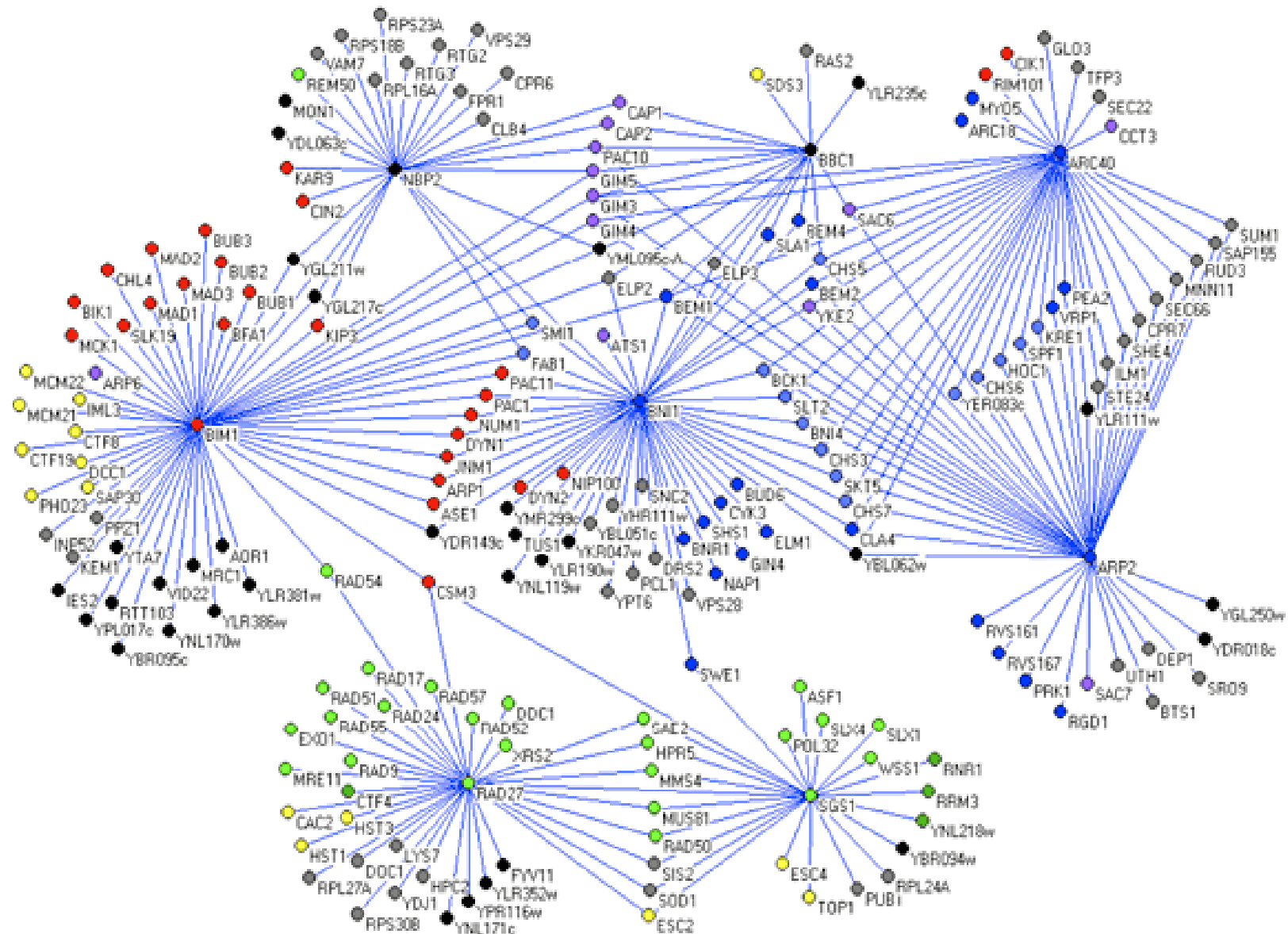
Insuficiencia cardiaca

Arritmia

La vida: entre el orden y el caos

- Un sistema demasiado ordenado no puede responder adecuadamente a cambios ambientales.
- Un sistema caótico es demasiado impredecible y desordenado.
- Los seres vivos entendidos como sistemas dinámicos suelen presentar comportamientos entre el orden y el caos.
- En la frontera entre el orden y el caos se maximiza la capacidad para adaptarse.

redes de regulación genética

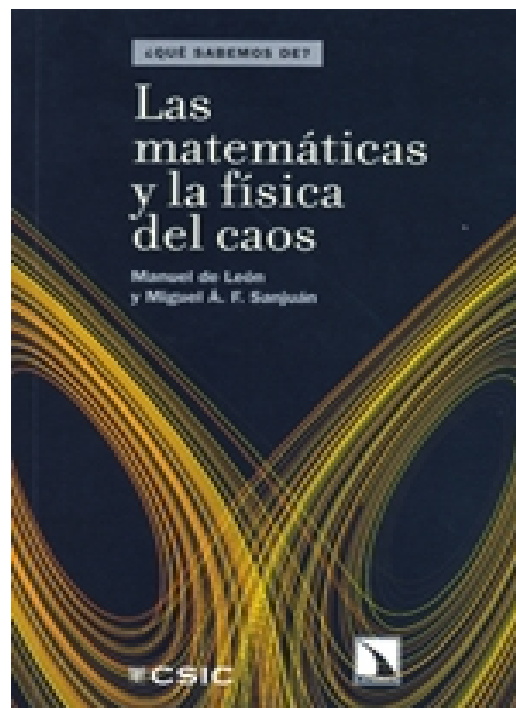
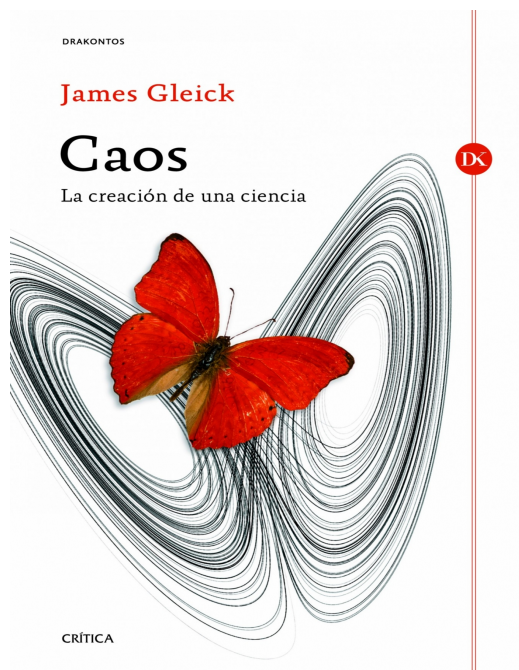


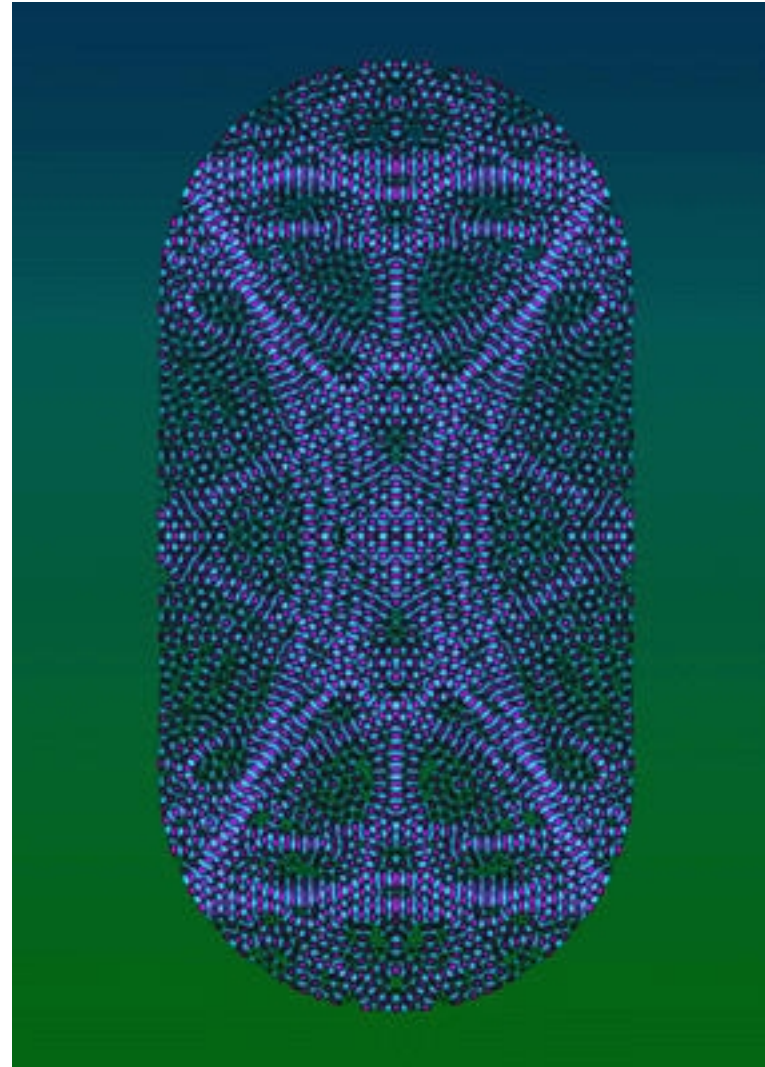
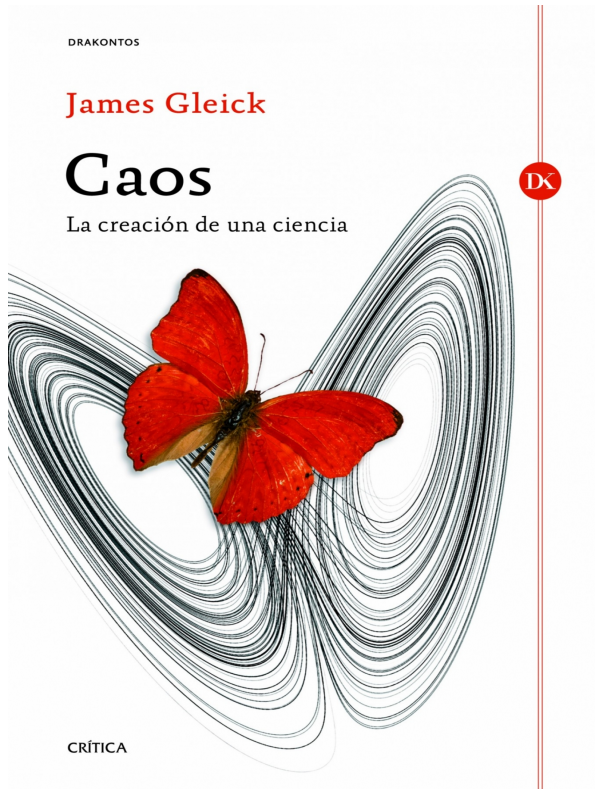
Resumen

- Caótico no es lo mismo que aleatorio.
- Determinista no es lo mismo que predecible.
- Sistemas sencillos pueden tener comportamientos muy complicados e impredecibles.

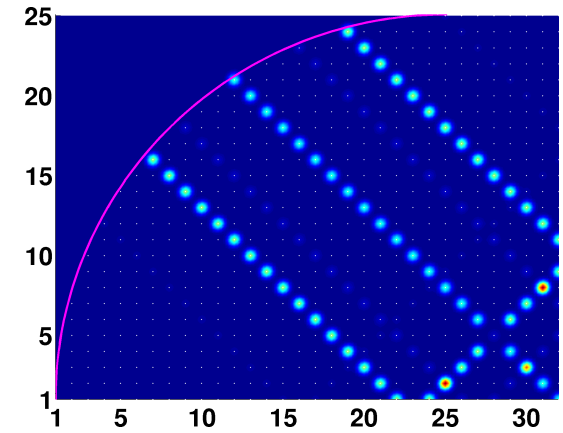
Resumen

- Caótico no es lo mismo que aleatorio.
- Determinista no es lo mismo que predecible.
- Sistemas sencillos pueden tener comportamientos muy complicados e impredecibles.
- Aún así, el caos tiene unas leyes que empezamos a comprender.
- Estas leyes matemáticas se aplican a multitud de sistemas diferentes en múltiples áreas del conocimiento humano y han cambiado nuestra forma de comprender el mundo.





E. Heller



V. Fernández-Hurtado *et al.*