NO LINEALIDAD, COMPLEJIDAD Y SISTEMAS SOCIALES*

*GRACIELA CHAPARRO GUEVARA***

Recibido:1 de julio de 2008
Aprobado:28 de julio de 2008

Artículo de investigación

* Este artículo es producto del trabajo de investigación de la autora en el grupo Vórtice, cuyo proyecto principal se titula Los espacios del determinismo. Tunja, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

** Economista UPTC (Tunja, 2006). Especialista en Matemática Aplicada, U. Sergio Arboleda (Bogotá, 2007). Coinvestigadora grupo Vórtice, UPTC, Tunja, desde 2005. E-mail: graciela_ch@hotmail.com

Resumen

El artículo inicia presentando un panorama acerca de los intentos de elaborar modelos de la realidad, que van desde la visión lineal clásica de las ciencias naturales hasta concepciones que aceptan la existencia del caos y de la impredecibilidad. Luego se plantea la posibilidad de aplicar soluciones intermedias que permitan modelar fenómenos complejos por medio de la búsqueda de una forma diferente de orden con el uso de los conceptos de realimentación, no linealidad, atractores extraños, caos y complejidad, y se utilizan ejemplos acerca de cómo puede manifestarse ese orden en lo complejo. Se señala que estos conceptos se empiezan a incorporar cada vez más al estudio de los sistemas sociales, pues en ellos es notoria la existencia de complejidad en la multiplicidad de componentes que entran en relación.

Palabras clave: realimentación, no linealidad, atractores extraños, caos, complejidad, ciencias sociales.

NON-LINEARITY, COMPLEXITY AND SOCIAL SYSTEMS

Abstract

The article starts by presenting an overview of the attempts to develop models of reality, ranging from the traditional linear view of the Natural Sciences, to conceptions that accept the existence of chaos and unpredictability. Afterwards, the article raises the possibility of applying intermediate solutions that enable the modeling of complex phenomena by means of the search for a different form of order with the use of concepts such as feedback, non-linearity, strange attractors, chaos and complexity; as well as using examples on how that order can be manifested in chaos. It is noted that these concepts are beginning to be incorporated more and more to the study of social systems, since they possess an inherent complexity due to the multiplicity of components that are interrelated.

Key words: feedback, non-linearity, strange attractors, chaos, complexity, Social Sciences.

Introducción

El análisis de sistemas no lineales, dinámicos y complejos es un campo de estudio interdisciplinario que se ha aplicado progresivamente en las ciencias naturales y en las ciencias sociales en razón a que ofrece herramientas adecuadas para el análisis y modelización de fenómenos donde confluyen, simultáneamente, una multiplicidad de factores y secuencias causales.

La idea, configurada por la ciencia clásica, de que los fenómenos físicos y sociales tienen una naturaleza lineal, excluye el hecho de que la realidad es mucho más compleja de lo que la mente humana puede comprender; pero está basada en la necesaria confianza en que existen regularidades que dan lugar a la estabilidad y a la predecibilidad en sistemas simples y complejos.

Los comportamientos irregulares, inestables e impredecibles son asociados habitualmente con la presencia del azar, con sistemas en los cuales no es posible hacer un seguimiento de trayectorias individuales que, por tanto, no son susceptibles de ser analizados con modelos lineales de soluciones explícitas. Para este tipo de sistemas se usa la teoría de la probabilidad y la estadística.

Entre estos dos tipos de comportamiento, regulares y predecibles e irregulares e impredecibles, se sitúa el ahora conocido como comportamiento caótico, no lineal y complejo, asociado al determinismo, pero que no da lugar a evoluciones estables y predecibles como supuso la ciencia clásica, pues éste puede derivar en estructuras complejas, en la emergencia de nuevos comportamientos, en autoorganización. Estos son los temas de los que se ocupa el estudio de los sistemas complejos. Existen dos enfoques (Brings & Peat, 1990; Hayles, 1993) para abordar su análisis: el primero, se ocupa de los sistemas ordenados que evolucionan hacia el caos; se analiza el desarrollo de un sistema hacia estructuras complejas llamadas "atractores extraños" en donde se observa que la aleatoriedad de un fenómeno realmente sigue un patrón ordenado de comportamiento. El segundo trata de los sistemas en los que el caos da lugar al orden; aquí se analiza el surgimiento espontáneo de autoorganizaciones llamadas estructuras disipativas (Prigogine & Stengers, 2002).

Los dos enfoques se caracterizan por estudiar los mecanismos de realimentación, la carencia de linealidad, la presencia de formas complejas y de sistemas altamente sensibles a las condiciones iniciales. El presente artículo expone estos conceptos como una opción de estudio de los sistemas sociales, partiendo desde los sistemas ordenados que derivan en comportamiento caótico, en continuación de una investigación aplicada al estudio de la evolución del índice de precios de la Bolsa de Valores de Colombia (Chaparro, 2006). Debemos suponer que las relaciones humanas presentan una complejidad suficiente para presumir que las formas de estudio que puedan crearse para su comprensión necesiten cada vez más acudir a este tipo de modelos.

Desorden ordenado

Una característica propia de sistemas con evoluciones temporales aperiódicas es la realimentación, que se puede entender como un proceso en el que la acción de los términos o variables que componen un sistema influye en otros componentes del sistema. Otra forma de entender la realimentación es considerar que una salida se usa como entrada de un mismo proceso.

Existe la realimentación positiva en la cual la acción de una variable sobre otra se amplifica y la realimentación negativa en la que dicha acción es regulada. El efecto de *feedback* de un sistema de altavoces es el resultado de un proceso de realimentación positiva y el efecto que produce un termostato en un aparato eléctrico constituye un proceso de realimentación negativa.

En la linealidad no hay realimentación; un sistema se puede descomponer en sus partes básicas constitutivas y luego ser armado nuevamente. Esto tiene su expresión matemática: una función f es lineal si es aditiva y multiplicativa por una constante (escalar), esto es, f es lineal si

$$f(x+y) = f(x) + f(y)$$

y

$$f(c^*x)= c^*f(x)$$[1].

Esta es la expresión matemática del principio de superposición, el cual dice que a través del estudio o conocimiento de las partes constitutivas de un sistema se puede conocer el sistema en su totalidad, o, lo que es lo mismo, el todo es igual a la suma de sus partes. El principio de superposición representa la visión reduccionista y mecanicista de la ciencia clásica (Chaparro & Avila, 2005).

La realimentación da lugar al comportamiento no lineal. Un sistema que se describa por medio de ecuaciones no lineales no puede ser sujeto del principio de superposición, la acción de cada una de sus partes no puede ser separada, el sistema debe ser considerado en su totalidad. La comprensión de que existen mecanismos de realimentación entre las variables de un sistema que dan lugar a comportamientos no lineales es el punto de partida para entender la conducta 'caótica' y compleja de muchos fenómenos naturales y sociales.

Un sistema puede tener a la vez comportamientos lineales y no lineales. Por ejemplo, el humo ascendente de un cigarrillo en su primera parte lleva un flujo laminar y ordenado que cambia cualitativamente en un punto crítico, a partir del cual es imposible determinar un patrón de evolución. Este es el

[1] La representación gráfica de una función lineal es una línea recta o un plano.

comportamiento de los sistemas caóticos. Para entenderlo, se ha recurrido al estudio de la ecuación logística:

$$X_{t+1} = KX_t(1-X_t), \quad 0 < X_t < 1, \quad 0 < K < 4 \tag{1}$$

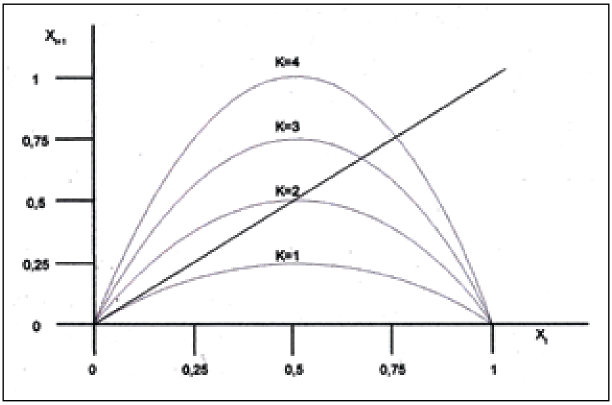
Este es un sistema no lineal debido al término (*1-X*) que multiplica a la variable *X*, es decir, hay un proceso de realimentación de la variable *X* sobre sí misma. Cada valor de X_t produce uno de X_{t+1} en un proceso de iteración[2].

La ecuación logística describe la trayectoria temporal de la variable *X*, que es una función de su valor previo y del parámetro *K*, es decir, representa una situación en la cual una observación de un fenómeno en el periodo *t+1* es una función de la observación en el periodo *t*. El valor de *K*, llamado parámetro de control, el único parámetro de la ecuación, determina la pendiente de la ecuación.

La iteración de funciones no lineales produce dos efectos que se oponen:

1. Incrementa el valor de inicio de la iteración produciendo un número cada vez mayor, esto es, cuando X_t toma un valor pequeño, X_{t+1} también toma un valor pequeño aunque mayor que el de X_t. El resultado es una elevación de la curva.

2. Reduce los valores resultantes a medida que crecen; es decir, la parábola llega a un punto máximo y luego desciende. Se tiene así un proceso de realimentación controlada que impide el crecimiento sin límites de la variable.



Gráfica 1. Ecuación logística en el espacio de fases para diferentes valores de K.
Fuente: Chaparro (2006).

---

2 Iterar una función significa usar el resultado de un cálculo como comienzo del siguiente.

Atractores estables o dinámica clásica

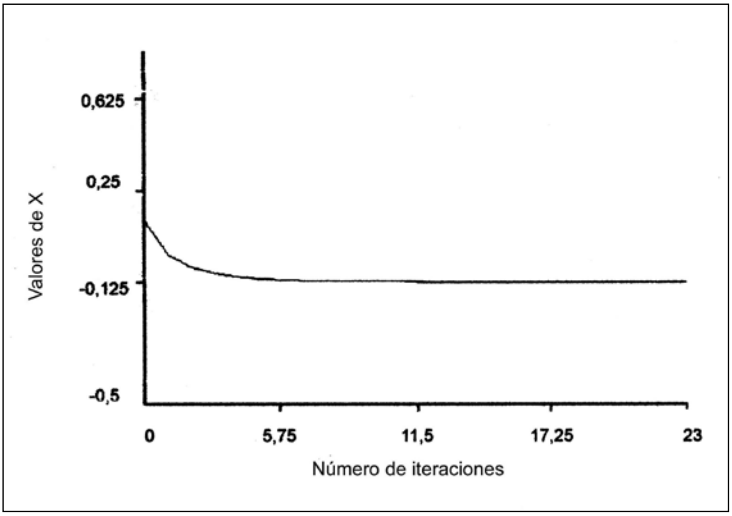
Por medio de la ecuación logística es posible observar el comportamiento dinámico clásico de un sistema. Esto es posible dando un valor de inicio a la variable X $(0 < X_t < 1)$ en la ecuación $X_{t+1} = KX_t(1-X_t)$, e iterar el resultado obtenido. Esto dará la evolución temporal de la trayectoria del sistema dinámico. Los diferentes valores que tome el parámetro K modificarán la pendiente de la curva de fase, haciendo que la trayectoria temporal converja a puntos de equilibrio estable, o a evoluciones periódicas hasta que K asuma un valor 3,57, donde el comportamiento de la trayectoria será cualitativamente diferente.

1. Comportamiento estable:

X = 0,6 x 0,25(1-0.25)

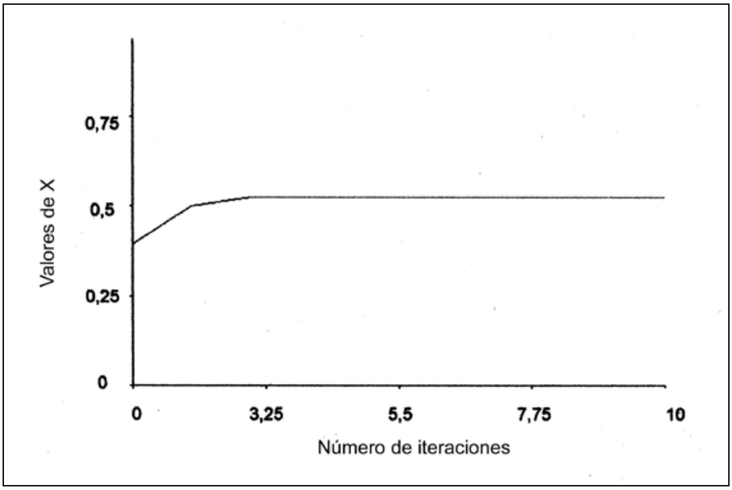
Número de iteraciones	*Valor final*	*Número de Iteraciones*	*Valor final*
1	0,1125	14	0,000112
2	0,59906	15	0,000067
3	0,033790	16	0,000040
4	0,019588	17	0,000023
5	0,011522	18	0,000013
6	0,006833	19	0,000007
7	0,004071	20	0,000004
8	0,002432	21	0,000002
9	0,001455	22	0,000001
10	0,000871	23	0,000000
11	0,000521		
12	0,000312		
13	0,000187		

Las situaciones presentes en la evolución de la trayectoria temporal son: para valores del parámetro de control $K \leq 3$, el sistema se comporta de manera estable con la trayectoria temporal convergiendo a puntos estables de equilibrio (Gráficas 2 y 3). Cuando el valor de K aumenta sobre 3, el punto de equilibrio se torna inestable y la trayectoria temporal es oscilatoria. Exhibe un ciclo de periodo dos (Gráfica 4), luego un ciclo de periodo 4 (Gráfica 5), luego aparece un ciclo de periodo 8 (Gráfica 6), periodo 16 (Gráfica 7), seguiría un ciclo de periodo 32, etc., con la periodicidad incrementándose por 2^n (n = 1, 2, 3,...).



Gráfica 2. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

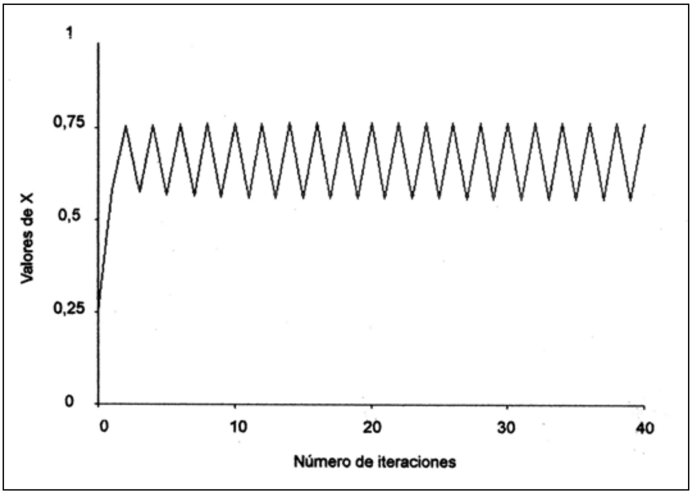
X = 2,1 x 0,25(1-0.25)



Gráfica 3. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

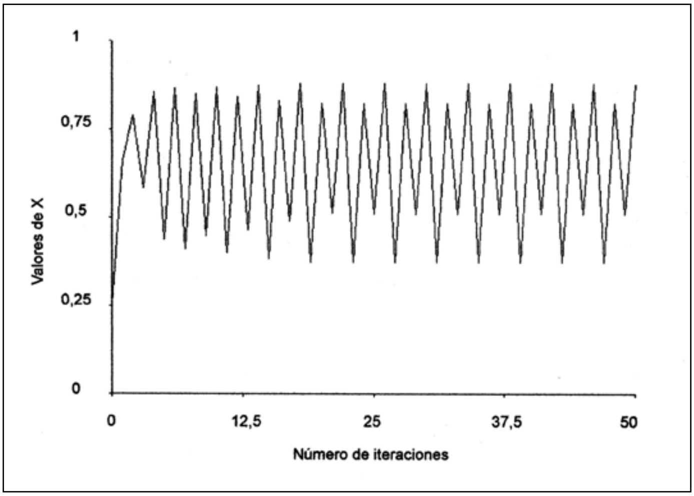
2. Comportamiento periódico

X = 3,1 x 0,25(1-0.25)



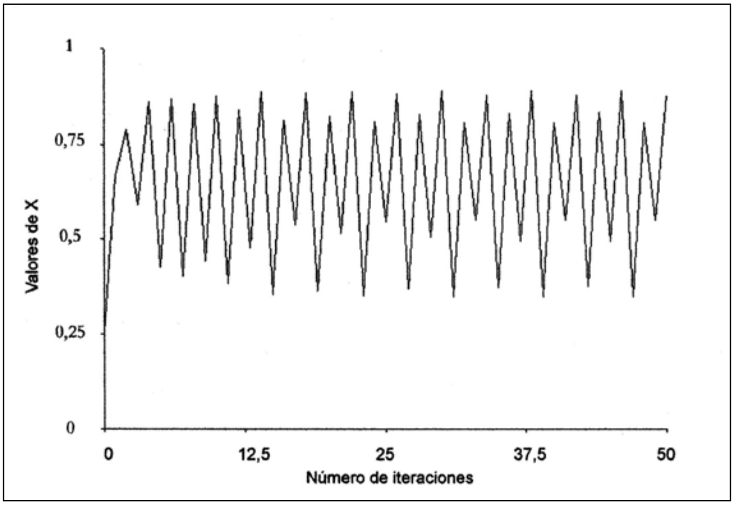
Gráfica 4. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

X =3,52 x 0,25(1-0,25)



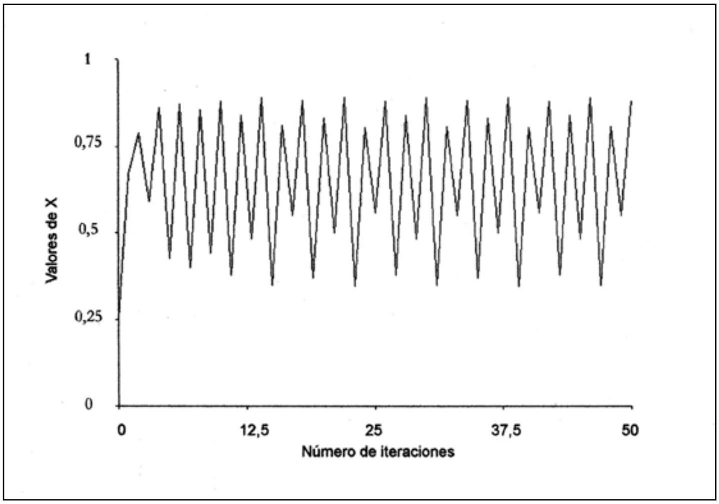
Gráfica 5. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

X = 3,56 x 0,25(1-0.25)



Gráfica 6. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

X = 3,567 x 0,25(1-0,25)



Gráfica 7. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

Dependiendo del valor del parámetro, un sistema dinámico se estabiliza a un punto de equilibrio llamado *atractor*. Hasta 1970 los únicos atractores conocidos eran los atractores clásicos de *punto fijo* y de *ciclo límite*, los cuales corresponden a estados estables y predecibles de un sistema. En el ejemplo de la ecuación logística, para valores de $1<K<3$ el sistema se estabiliza en un único punto. Este punto constituye el atractor del sistema, pues atrae a la trayectoria hacia sí. Es el tipo más simple de atractor y se lo llama atractor de punto fijo.

Para valores de $3<K<3{,}57$ el sistema se estabiliza en valores periódicos que la trayectoria sigue de forma regular. Cuando el comportamiento de un sistema dinámico a largo plazo sigue oscilaciones estables, se dice que converge a un atractor de ciclo límite, es decir, el sistema se compone de un número finito de estados que se repiten en cada periodo.

Estos dos tipos de atractores son los únicos considerados por la dinámica lineal. James Stewart resume el comportamiento de los atractores clásicos diciendo que los movimientos a largo plazo que representan los atractores de punto fijo y ciclos límite son, correspondientemente:

- estar en reposo en un estado estacionario
- repetir alguna serie de movimientos periódicamente

O, más simplemente:

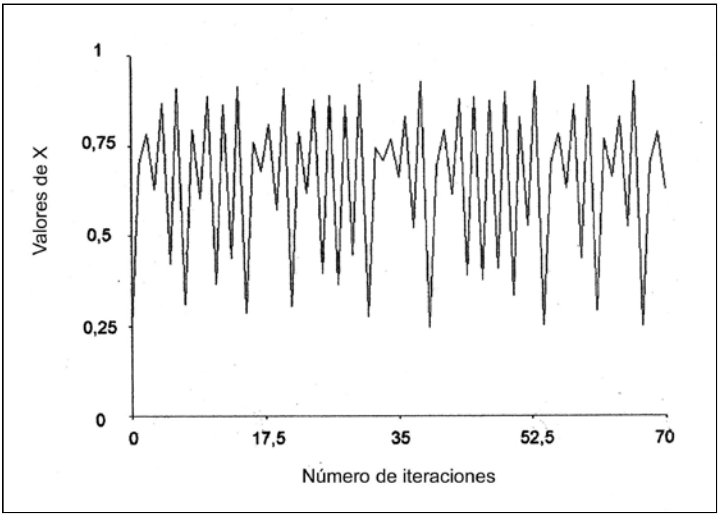
- permanecer quieto o
- dar vueltas y más vueltas (Stewart, 2001: 123).

Atractores extraños o dinámica caótica

Los *atractores extraños* corresponden a movimientos impredecibles, irregulares y aparentemente aleatorios que ocurren en un sistema dinámico. A los sistemas que convergen en el largo plazo a un atractor extraño se les llama *caóticos*.

La evolución temporal de la ecuación logística entra en comportamiento caótico para $3{,}57<K<4$; por ejemplo, para valores del parámetro K = 3,72 es difícil reconocer alguna pauta de movimiento y diferenciarlo de un comportamiento completamente aleatorio. (Ver gráfica 8)

X = 3,72 x 0,25(1-0.25)



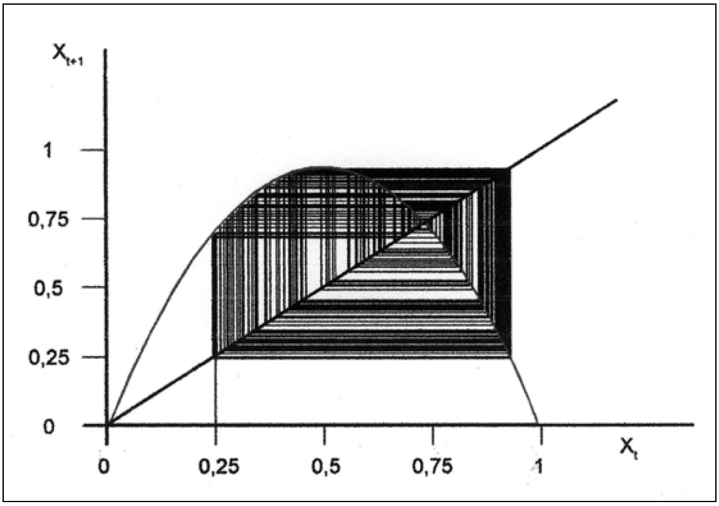
Gráfica 8. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

Alison Butler presenta de una forma sencilla el concepto de atractor extraño:

> Un "atractor extraño" es el nombre dado al caso donde hay una región, más que un conjunto finito de puntos, que atrae la trayectoria temporal de la variable. Esto es, después de algunas iteraciones, las cuales varían dependiendo de la función, la trayectoria temporal de la variable está completamente contenida en esta región (el atractor extraño). Así, aunque la trayectoria es aperiódica y por lo tanto nunca alcanza un equilibrio en el sentido standard, tampoco deja nunca el atractor extraño y por lo tanto no es inestable (...) (Butler, 1990: 45).

De aquí se desprende el hecho de que a los sistemas que presentan evoluciones caóticas se los considere como globalmente estables (porque su trayectoria queda atrapada en una región acotada del espacio de fases) pero localmente inestables (porque son irregulares). (Ver Grafica 9)

En la Gráfica 9 se observa que para 150 iteraciones, la trayectoria temporal de X está contenida en área limitada y la distribución de los puntos es "densa". Esta región limitada es el atractor. Si se iterara la función un mayor número de veces, el área aparecerá como un bloque sólido aunque la variable nunca repita ningún valor dos veces.



Gráfica 9. Atractor extraño en el espacio de fases.
Fuente: Chaparro (2006).

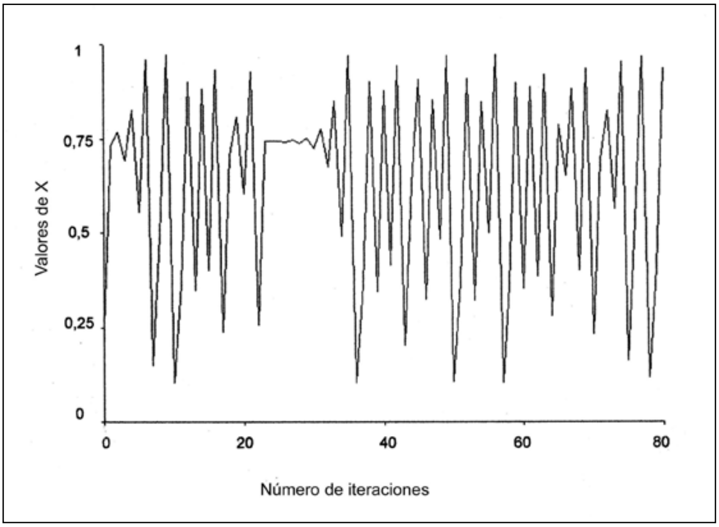
Además del comportamiento aperiódico e irregular con apariencia de aleatoriedad y de la convergencia a un atractor extraño[3], el comportamiento caótico también se caracteriza por la sensibilidad a las condiciones iniciales, es decir, pequeños cambios en el valor de la condición inicial producen grandes cambios posteriores. A esta propiedad se la conoce como "efecto mariposa"[4]. Se puede observar este fenómeno al cambiar levemente la condición inicial:

---

[3] La matemática del caos determinista ha desarrollado diferentes maneras de caracterizar el caos, Por ejemplo, Martelli, Dang y Seph (1998) presentan varias características distintivas de los sistemas caóticos, desarrolladas por diferentes autores: Li-Yorke: existencia de órbitas de periodo tres; Devaney: sensibilidad a las condiciones iniciales, transitividad y órbitas periódicas densas; Wiggins: sensibilidad a las condiciones iniciales y transitividad; y Martelli: órbitas densas en *X*, las cuales son inestables. La otra caracterización es la de D. Ruelle: de convergencia de las órbitas a un atractor extraño.

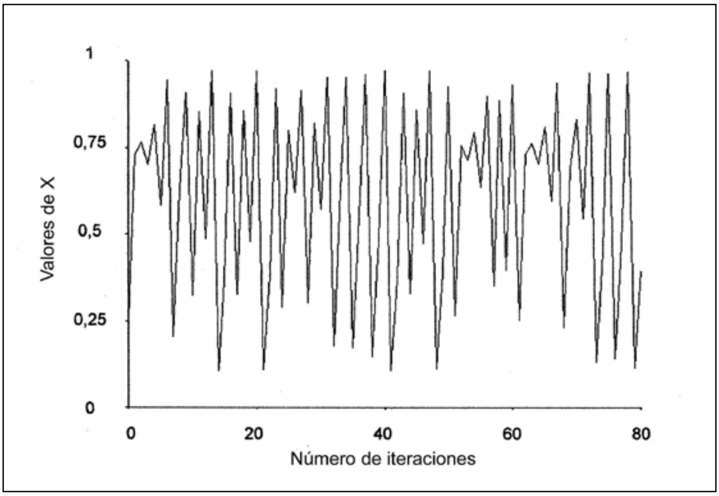
[4] La demostración de la "sensibilidad a las condiciones iniciales" fue efectuada por Edward Lorenz con sus estudios sobre meteorología. En 1961, al repetir una secuencia de datos en su modelo sobre la evolución climática, introdujo sólo tres cifras decimales de las seis con que había corrido inicialmente el programa de computador. El producto de la representación de su sistema se parecía a las alas de una mariposa y habían sido trazadas por las órbitas a medida que se repetían los movimientos cíclicos.

X = 3,89 x 0,25(1-0.25)



Gráfica 10. Evolución temporal.
Fuente: Chaparro (2006).

X = 3,89x 0,251(1-0.251)



Gráfica 11. Evolución temporal
Fuente: Chaparro (2006).

La sensibilidad a las condiciones iniciales es una característica importante de los sistemas no lineales. Las trayectorias de dos esferas en el juego de *Pinball* son diferentes a pesar de que las condiciones de partida sean prácticamente iguales (Lorenz, 1995: 16). Los sistemas lineales no son sensibles a las condiciones iniciales; dos lanzamientos desde el mismo punto seguirán trayectorias similares.

Al contrario de lo que ocurre en un mundo lineal donde efecto y causa son proporcionales (si se modificara el valor de una variable en su quinto lugar decimal, su trayectoria seguiría un camino predecible), en la no linealidad, efectos desproporcionados pueden estar precedidos por causas mínimas. Para sistemas lineales, los errores en la medición de las condiciones iniciales afectan relativamente poco el resultado final y el sistema sigue comportándose de manera previsible; sin embargo, la falta de correspondencia entre causa y efecto de la no linealidad conduce a que pequeños errores en el cálculo (o la imposibilidad de mediciones absolutamente exactas) de las condiciones iniciales vuelvan imprevisible la evolución de un sistema; bajo las mismas leyes, diferentes condiciones iniciales producen diferentes evoluciones en el tiempo.

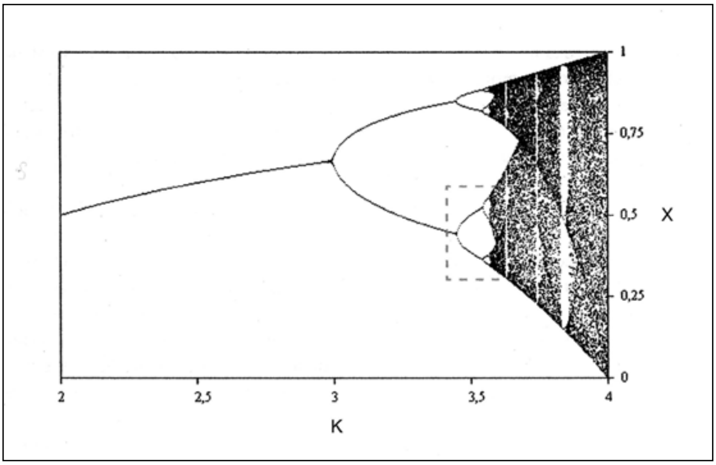
La propiedad de divergencia entre trayectorias causada por la no linealidad es la clave para comprender por qué el determinismo que rige a un sistema dinámico no implica necesariamente su predecibilidad. La situación es cualitativamente diferente en los atractores clásicos de los sistemas lineales, pues en ellos las órbitas vecinas siguen estando cerca, los pequeños errores se mantienen limitados y el comportamiento es predecible.

Los atractores extraños tienen una característica muy importante y es que poseen dimensión fractal[5]. La palabra fractal viene del latín *fractus* que significa irregular, pero Benoit Mandelbrot[6] la relacionó también con fraccional y fragmentario. Un fractal es una forma geométrica que se repite a sí misma en cualquier escala a la que se la observe, es decir, un objeto que conserva su forma al variar la escala de observación recibe el nombre de fractal. Esta propiedad se conoce como autosimilitud y es la característica distintiva de los objetos fractales.

La forma fractal de la ecuación logística se observa a través del diagrama de Feiggenbaum. Es fácil apreciar que la estructura de bifurcaciones (de las duplicaciones de periodo) es exactamente la misma al variar la escala de observación. (Ver Grafica 12)

---

[5]La dimensión fractal es una dimensión no entera, por ejemplo, objetos fractales como la Alfombra de Sierpinsky, la Curva de Koch o el Triángulo de Sierpinsky tienen dimensiones de 1,892; 1,2619 y 1,5850, respectivamente. Esto significa que son objetos que se encuentran entre una línea de dimensión entera 1 y un plano de dimensión entera 2.
[6]Creador de la teoría fractal.



Gráfica 12. Estructura fractal de la ecuación logística.
Fuente: Chaparro (2006).

La ecuación logística es un ejemplo de que el movimiento descrito por un modelo no lineal muy sencillo puede desarrollar una dinámica muy compleja de movimientos irregulares sin que existan componentes aleatorios, además de poseer una estructura geométrica muy compleja, como un atractor extraño.

¿Lineal o no lineal?

Uno de los propósitos de la ciencia ha sido predecir el futuro para poder controlar toda la realidad. Las herramientas matemáticas adecuadas a este propósito son las ecuaciones lineales que por lo general tienen soluciones explícitas; éstas implican encontrar fórmulas para los valores futuros de una cantidad. El éxito en la predicción generó la idea de que la naturaleza se rige por reglas lineales y que la no linealidad es una excepción.

Un ejemplo sencillo de modelización lineal se encuentra en el "Teorema de la Telaraña"[7], cuyo nombre se debe a la forma en que lucen los diagramas resultantes de la interacción entre las curvas de oferta y demanda. Su intención es predecir la evolución del mercado de un producto dados unos supuestos:

[7] Teorema que proviene del análisis económico.

1. Las curvas de oferta y demanda son lineales.
2. En cada periodo los productores confían en que el precio que prevaleció durante el periodo se mantiene en el siguiente.
3. La oferta y la demanda son constantes en el tiempo a pesar de los movimientos de ajuste y de la redistribución periódica de ingresos de compradores y vendedores ocasionada por las fluctuaciones en el precio.

Las ecuaciones del modelo bajo estos supuestos son:

$S(t+1) = \mathrm{A}p(t) + \mathrm{B}$
$D(t+1) = \mathrm{C}p(t+1) + \mathrm{E}$

Donde $S(t)$ y $D(t)$ son las funciones de oferta y demanda, $p(t)$ es el precio del producto en el mercado, y A, B, C y E son constantes.

La situación que se presenta es la siguiente:

Durante el periodo 1 las cantidades producidas llevadas al mercado son grandes y los precios son bajos, entonces los productores reducen su producción y en el periodo 2 las cantidades serán menores que los precios; los precios elevados llevan al productor a aumentar su oferta y en el periodo 3 se volverá a encontrar con la situación del periodo 1, y así sucesivamente.

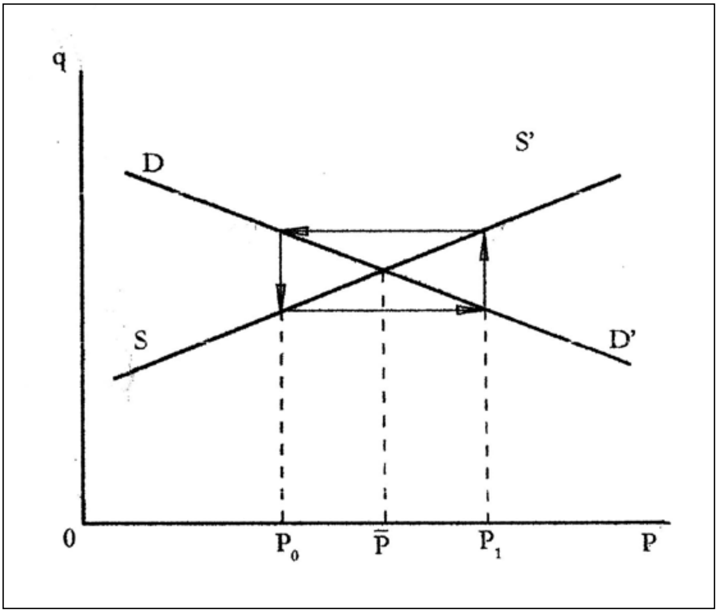
El mercado puede adoptar tres formas en el largo plazo:

a. Oscilaciones Persistentes:

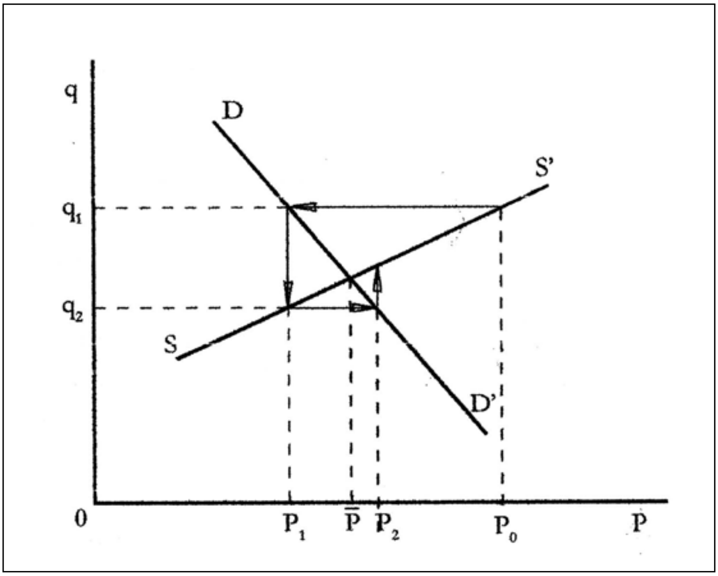
Si las reacciones de demandantes y oferentes, medidas por medio de la pendiente de las curvas se equiparan, es decir, las pendientes de las dos curvas son iguales, se presentan fluctuaciones continuas de amplitudes iguales, lo cual significa que el mercado alternará entre llenado y vaciado y el equilibrio dinámico que se alcanza es del tipo ciclo límite. (Ver Gráfica 13)

b. Oscilaciones Convergentes:

Si la curva de oferta es menos pendiente que la de demanda, las fluctuaciones se hacen convergentes; las cantidades de producción variarán muy poco hasta alcanzar tarde o temprano un punto de equilibrio. Aquí, el sistema llega a un equilibrio dinámico de tipo punto fijo. (Ver Gráfica 14)



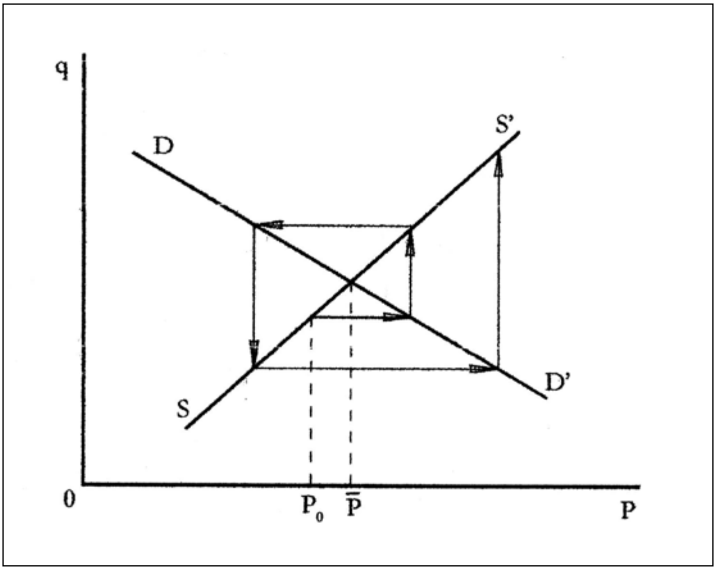
Gráfica 13. Equilibrio dinámico de tipo ciclo límite.
Fuente: Diccionario de Economía Política, p. 764.



Gráfica 14. Equilibrio dinámico de tipo punto fijo.
Fuente: Diccionario de Economía Política, p. 764.

c. Oscilaciones Explosivas:

Si la pendiente de la curva de oferta sobrepasa a la pendiente de la curva de demanda, las fluctuaciones se tornan divergentes y el sistema se apartará cada vez más en cada periodo de una situación de equilibrio. (Ver Gráfica 15)



Gráfica 15. Equilibrio dinámico divergente.
Fuente: Diccionario de Economía Política, p. 764.

Sin los supuestos que acompañan al modelo, se volvería muy complicada la evolución del mercado debido a que las reacciones de compradores y vendedores ante cada nivel del precio podrían adoptar múltiples formas. Conocidas las leyes de movimiento de un sistema y dada una condición inicial será posible conocer su evolución futura. Esto sólo lo permite un modelo lineal o cuasi lineal.

En 1890 Henry Poincaré encontró que para el sistema Sol-Tierra-Luna, las ecuaciones newtonianas de movimiento no tenían las soluciones explícitas de un sistema lineal. En un sistema de dos cuerpos, Sol-Tierra, por ejemplo, se considera que sólo actúa la fuerza de gravedad de las dos masas que mantiene unidas a las partes por órbitas elípticas, regulares y periódicas. Sin embargo, al agregar un tercer cuerpo al sistema, el Sol, se encuentra que el recorrido que siguen las masas sufre ligeras perturbaciones: la fuerza de la gravedad de la Luna influye sobre la trayectoria de la Tierra y ésta a su vez afecta a la trayectoria que sigue el Sol, generando pequeñas variaciones que influyen en la dinámica de los tres astros en movimiento. Al continuar el movimiento de los cuerpos, las variaciones continuarán afectando las órbitas ligeramente, en un proceso de realimentación que hará que se presenten irregularidades en las órbitas periódicas de los componentes del sistema (Monroy, 1997 43). La irregularidad es endógena al sistema, está causada por la influencia de la fuerza de la gravedad del tercer cuerpo y da como resultado una conducta de irregularidad y aperiodicidad que imposibilita la predicción.

A la interacción Sol-Tierra-Luna se la conoce con el nombre de "problema de los tres cuerpos" y es la primera prueba de que un sencillo sistema de pocos componentes en interacción desarrolla una dinámica compleja de irregularidades. La visión de un universo lineal establece que los fenómenos se pueden describir por medio de relaciones funcionales lineales o cuasi lineales. Al analizar un sistema es muy arriesgado afirmar que presenta un comportamiento lineal sin considerar primero el tipo de interacción de las variables o componentes del sistema. Es muy probable que sistemas con pocos componentes desarrollen un comportamiento complejo a que se comporten de manera estable, regular y predecible como lo supone la dinámica lineal.

El análisis de la no linealidad pone de relieve su carácter sistémico, pues resalta las interacciones entre las partes de un sistema y entre la microescala y la macroescala:

> Una revolución en el Oriente Medio, por ejemplo, podía desencadenar una súbita alza en los precios del petróleo, provocando escasez de energía y espirales inflacionarias en los países desarrollados, lo que a su vez podía hacer estallar una recesión global que obligaría a instrumentar importantes reestructuraciones en las finanzas internacionales (Hayles, 1993: 24).

Este comportamiento es muy evidente en los mercados de valores. El movimiento de los precios de las acciones registrado por los índices generales de las bolsas de valores está gobernado por la naturaleza del comportamiento humano, por decisiones individuales tomadas con base en expectativas de ganancia rápida que se pueden transformar en pérdidas inesperadas. Las fluctuaciones del precio ante informaciones negativas del mercado junto con la rapidez en las transacciones, puede desencadenar reacciones de pesimismo ante el precio y multiplicarse rápidamente hasta derivar en una grave crisis económica. Las rápidas catástrofes bursátiles o los movimientos no previstos de los precios al alza parecen aleatorios y sin embargo son generados por la dinámica del sistema bursátil.

Aplicación a las ciencias sociales

Un sistema complejo es un conjunto de partes interconectadas e interdependientes. Las interacciones no lineales mantienen unido al sistema. En un sistema lineal las partes son independientes, por eso se pueden separar y unir nuevamente. La complejidad de los sistemas está dada por la no linealidad, no importa si es un sistema de pocos componentes como el sistema Sol-Tierra-Luna o un sistema donde confluyen múltiples variables como los mercados bursátiles. La complejidad no se relaciona con sistemas que son solamente complicados.

La complejidad de un sistema es muy difícil de medir. Una de las formas de medir la complejidad se conoce como complejidad algorítmica. Se trata de medir la complejidad en términos de información. Para una secuencia de números como 2, 4, 6, ,8, ..., se puede escribir un algoritmo o programa de computador con la orden "escriba la secuencia de números pares", mientras que una secuencia de números aleatorios como, 2, 6, 9, 1, 7, 3, 0, 7, 2, 5,..., el algoritmo necesario es el mismo número escrito en el programa. Así, la complejidad se mide cómo la cantidad mínima de instrucciones de un programa de computador para describir un sistema. Desde este punto de vista, un sistema ordenado es menos complejo mientras que la complejidad es máxima en sistemas aleatorios (Gell-Mann, 1998: 57). Intuitivamente se puede suponer que el grado de complejidad de un sistema social es alto y que presenta múltiples interacciones, pero su determinación es un aspecto no estudiado aún por la ciencia de la complejidad[8].

El estudio de la complejidad y del comportamiento caótico se ha desarrollado desde las ciencias exactas en las cuales existe la posibilidad de realizar experimentos controlados y obtener series largas de datos no ruidosos. Las ciencias sociales no tienen esta posibilidad; sin embargo, la característica de no linealidad de los sistemas complejos hace que éstos tengan más probabilidades de tener una evolución temporal complicada[9], que un sistema lineal. Este es un hecho que se puede aplicar a los sistemas sociales.

Los estudios realizados en la aplicación de la dinámica no lineal se han realizado desde dos áreas de trabajo: manejo de modelos que permiten la formación de trayectorias caóticas y detección de comportamientos caóticos en series de tiempo (Boldrin, 1988: 50). En el primer campo de trabajo se

[8]Carlos Maldonado en *Complejidad y ciencias sociales: El Problema de la Medición en los Sistemas sociales Humanos* (http://www.complexsites.com/gpage7.html), aborda el problema de la medición de la complejidad en los sistemas sociales humanos.

[9]Lo que se puede observar empíricamente en las variables de un sistema, natural o social.

han desarrollado modelos no lineales[10] de los cuales se sabe que pueden desarrollar diversos comportamientos que pueden ser modificados variando los valores de los parámetros[11].

En el trabajo con series de tiempo existen dos aproximaciones. Ya que el comportamiento caótico sólo surge en sistemas no lineales, la primera aproximación prueba la presencia de no linealidades en los datos de una serie de tiempo. La presencia de no linealidades aporta información para modelar teóricamente comportamientos complejos. La segunda aproximación prueba directamente la presencia de caos en los datos de una serie de tiempo. Sin embargo, hay muchos problemas en la aplicación directa de los test para detectar caos. Lo fundamental es la sensibilidad de los sistemas caóticos a cambios pequeños en el valor de los parámetros y a las condiciones iniciales; de aquí que la cantidad y calidad de los datos sea muy importante. Para que las pruebas o test de caos sean correctas se necesitan datos muy precisos.

El grado de precisión es un problema en ciencias sociales donde, como se sabe, es imposible realizar experimentos controlados, especialmente a un nivel macro; así, una serie temporal está lejos de ser perfecta y la calidad de los datos disminuye debido al redondeo; los datos no tienen la precisión requerida por los test de caos. Sin embargo, lo que se busca con la aplicación de las técnicas de detección de comportamientos caóticos en series temporales es conocer el proceso generador de la serie, ya que, como se ha visto con el ejemplo de la curva logística, un sistema dinámico no lineal puede generar comportamientos estables, comportamientos periódicos o regulares y comportamientos caóticos con apariencia de aleatoriedad y, gráficamente, una serie temporal aleatoria y un comportamiento de caos determinista muestran una apariencia similar; la consecuencia es que ambos comportamientos sean considerados como aleatorios.

Es importante resaltar que las ciencias sociales han empezando a incorporar los conceptos de complejidad y caos a los problemas teóricos, pues el análisis lineal está mostrando ser muy limitado en un mundo de fenómenos no lineales.

El comportamiento no lineal ha suscitado el interés en muchas áreas del conocimiento, de él se han derivado estudios en dinámica no lineal, termodinámica irreversible, meteorología o epidemiología (Hayles, 1993: 28), y se empieza a aplicar también en las ciencias sociales a través de modelos que desarrollan evoluciones caóticas o del análisis de series de tiempo para encontrar estructuras complejas como son los atractores extraños en la evolución temporal de una variable.

[10] Como la ecuación logística usada para modelar dinámica poblacional.

[11] De esto se encarga la Teoría del Control.

Bibliografía

BERTALANFFY, Ludwig Von. (1995): *Teoría general de los sistemas*. México: FCE.

BOLDRIN, Michele. (1988). "Persistent oscillations and chaos in dynamic economic models". En: ANDERSON, Philip W. et al. (ed). *The economy as an evolving complex system*. Santa Fe: Santa Fe Institute.

BRINGS, John & PEAT, David. (1990). *Del caos al orden: guía ilustrada de la teoría del caos y la ciencia de la totalidad*. Barcelona: Gedisa.

BUTLER, Allison. (1990). "A methodological approach to chaos: are economists missing the point? En: *Review of the Federal Reserve Bank of St. Louis.*

CAMBELL, Ali Bulent. (1993). *Applied chaos theory. A paradigm for complexity*. Estados Unidos: Academic Press.

CHAPARRO, Graciela. (2006). *La dinámica no lineal en el análisis económico: una aproximación.* Monografía presentada para optar al título de economista. Escuela de Economía, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

CHAPARRO, Graciela & AVILA, Roberto. (2005). "La presencia del caos en un mundo determinista". En: *Cuestiones de Filosofía,* No 7. Tunja: UPTC.

DICCIONARIO DE ECONOMÍA POLITICA. ORTELLS, Alfredo (ed). España.

GELL-MAN, Murray. (1998). *El Quark y el Jaguar*. Barcelona: Tusquets.

GLEICK, James. (1998). *Caos, la creación de una ciencia*. España: Seix Barral.

HAYLES, Katherine. (1993). *La evolución del caos: el orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas*. España: Gedisa.

LORENZ, Edward N. (1995). *La esencia del caos*. Madrid: Debate.

MALDONADO, Carlos. (2001). "Visiones sobre la complejidad". En: *Colección Filosofía y ciencia,* Vol 1. Bogotá: Ediciones El Bosque.

MALDONADO, Carlos. "Complejidad y ciencias sociales: El Problema de la medición en los Sistemas sociales Humanos". En: http://www.complexsites.com/gpage7.html

MANDELBROT, Benoit. (1996). *Los objetos fractales*. España: Tusquets.

MARTELLI, M.; DANG, M. & SEPH, T. (1998). "Defining Chaos". En: *Mathematics Magazine*, No. 2, Vol. 71. Fullerton: California State University.

MONROY, C. (1997). *Teoría del caos*. México: Alfaomega.

PRIGOGINE, Ilya & STENGERS, Isabel. (2002). *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia*. 2da ed. Madrid: Alianza Universidad.

RUELLE, David. (1995). *Azar y caos*. España: Alianza Universidad.

STEWART, Ian. (2001). *Juega Dios a los dados?* Barcelona: Crítica.