

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS VIII JORNADAS

VOLUMEN 4 (1998), Nº 4

Horacio Faas

Luis Salvatico

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



Caos, determinismo y aleatoriedad

*Olimpia Lombardi**

Sin negar la utilidad de muchas de sus aplicaciones, puede afirmarse que la Teoría del Caos se ha convertido en una de las nuevas "modas" de la ciencia actual; en los últimos años, expresiones como "caos", "desorden" y "medio aleatorio" han invadido el campo científico a través de libros, revistas y temas de coloquios, e incluso identifican las tareas de ciertos laboratorios de investigación. Pero, como suele suceder con los temas de moda, las nociones asociadas a la Teoría del Caos han desbordado rápidamente su cauce original para ingresar en las más variadas discusiones, donde los contenidos precisos de los conceptos con frecuencia resultan totalmente tergiversados. Así, por ejemplo, pueden encontrarse las nociones de desorden y no linealidad yuxtapuestas a consideraciones acerca de *management* e investigación de mercado que aventuran osadas conclusiones acerca del carácter "destrutivo" del orden (Etkin, 1993, p.21). Incluso, algunos autores vinculan la noción de caos con el concepto de irracionalidad y con el definitivo "destronamiento de la razón" (Martínez Nogueira, 1993, p.12). Este avance de los conceptos asociados a la Teoría del Caos ha superado incluso los límites del campo específicamente científico, introduciéndose en áreas ajenas a la ciencia, por ejemplo, ha conducido a interpretar la existencia del caos físico como testimonio de un Creador que interviene continuamente sobre un universo en evolución indefinida e impredecible (*cf.* Martí, 1991, p.32).

Pero no sólo en los ámbitos ajenos a la ciencia la Teoría del Caos inspira reflexiones de tono filosófico, también algunos científicos aventuran conclusiones que exceden su campo de estudio. Ejemplo de ello es quienes consideran que la existencia de sistemas caóticos afecta la validez del propio método científico e incluso creen encontrar en la Teoría del Caos la respuesta al viejo problema del libre albedrío (*cf.* Crutchfield *et al.*, 1987). El aspecto que desencadena tan variados comentarios pseudo-filosóficos es el supuesto carácter indeterminista de la Teoría del Caos; en este sentido, algunos autores colocan esta teoría en una posición equivalente a la Mecánica Cuántica en lo que se refiere al colapso de la concepción determinista del universo (*cf.* Crutchfield *et al.*, 1987; Davies, 1990).

El objetivo del presente trabajo consiste en brindar un análisis epistemológico de la Teoría del Caos en relación a los conceptos de determinismo

* Universidad de Buenos Aires.

y aleatoriedad. Tal análisis se dirige a poner de manifiesto en qué medida resultan filosóficamente adecuadas las numerosas conclusiones extra-científicas que suelen inferirse a partir de esta nueva teoría. En particular, se cuestionarán los argumentos en favor del supuesto indeterminismo implicado por la teoría, así como la definición de la noción de caos en función del concepto de complejidad algorítmica.

* * *

¿Qué afirma en realidad la Teoría del Caos?. Si bien no existe una definición del concepto de caos unánimemente aceptada en la comunidad científica (*cf.* Batterman, 1993), las diversas definiciones coinciden en aplicar el predicado "caótico" a las soluciones de ciertas ecuaciones diferenciales no lineales, cuando éstas resultan altamente sensibles a las condiciones iniciales. Dado que la Teoría del Caos es una teoría matemática, el análisis de las ecuaciones puede abordarse desde una perspectiva puramente sintáctica, con independencia de la interpretación semántica de las variables involucradas. Pero, en general, la teoría se aplica al estudio de ecuaciones dinámicas, donde la variable independiente representa la dimensión temporal; de este modo, el predicado "caótico" pasa a aplicarse a ciertos sistemas cuyo comportamiento temporal se describe mediante tales ecuaciones dinámicas (1), las soluciones de dichas ecuaciones se convierten en trayectorias en el espacio de las fases correspondiente al sistema (2). Sobre la base de esta interpretación, en un sistema caótico las trayectorias divergen rápidamente de modo que, si se toman dos puntos del espacio de las fases separados una distancia $d(0)$ en $t=0$, la distancia entre las trayectorias que se inician en ellos aumentará exponencialmente de acuerdo con la siguiente expresión:

$$d(t) = d(0) e^{t/\tau} \quad \text{con } 1/\tau > 0$$

donde τ se denomina "tiempo de Lyapounov". Esta característica de los sistemas caóticos implica una importante consecuencia respecto de la predictibilidad de sus estados futuros. En la práctica los inevitables errores experimentales impiden conocer con precisión infinita el estado inicial de un sistema. Si se trata de un sistema no caótico, la situación no es grave: pequeñas incertidumbres en las condiciones iniciales producen incertidumbres grandes pero acotadas en el curso ulterior de la evolución. Pero si el sistema es caótico, las pequeñas incertidumbres iniciales se amplifican exponencialmente con el transcurso del tiempo de modo tal que, para tiempos muy superiores al tiempo de Lyapounov, la predicción unívoca de los estados futuros del sistema se torna imposible.

¿Es suficiente esta peculiaridad de los sistemas caóticos para afirmar su carácter indeterminista? Aún quienes ven en la Teoría del Caos el fin del sueño laplaceano (*cf.* Prigogine & Stengers, 1990), coinciden en fundar la

impredictibilidad de los sistemas caóticos en la rápida amplificación de los errores iniciales. La imposibilidad de predecir unívocamente los estados futuros de un sistema caótico para tiempos muy superiores al tiempo de Lyapounov, deja abierta únicamente la posibilidad de predicciones de tipo estadístico. Pero si esto es así, la Teoría del Caos no implica indeterminismo ontológico, siquiera en el caso de una interpretación realista de las ecuaciones diferenciales (3). Por el contrario, el determinista ontológico puede defender su posición sobre la base del carácter determinista de las ecuaciones "caóticas": las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento caótico son totalmente deterministas en la medida en que, dado el valor de las variables dependientes en un cierto instante, fijan unívocamente el valor de dichas variables en todo instante posterior; en el espacio de las fases esto indica que las trayectorias no pueden cortarse. Por lo tanto, la probabilidad involucrada en la predicción del comportamiento de un sistema caótico puede fácilmente interpretarse como medida de la ignorancia del observador. Tal interpretación surge de un modo tan natural que, por ejemplo, Paul Davies, en un artículo titulado sugestivamente "*Chaos frees the Universe*", al tiempo que argumenta en favor del carácter abierto del universo y de la realidad del libre albedrío, sostiene que:

En cierto sentido, el azar o la aleatoriedad pueden ser adjudicados a la ignorancia respecto de los detalles [...] el caos determinista se manifiesta como aleatorio debido a que necesariamente ignoramos los detalles ultra-finos de incluso unos pocos grados de libertad (Davies, 1990, p.51)

Pero no todos los autores incurrir en esta transposición de los planos ontológico y gnoseológico; por ejemplo, en un artículo referido a la relación entre el concepto de caos y el problema de la ergodicidad, puede leerse:

Esta sensibilidad a las condiciones iniciales pone en aprietos al determinista más estricto, según el cual toda evolución puede ser predicha (Eckmann & Mashaal, 1991, p.728)

Aquí los autores distinguen el sentido del concepto de determinismo al cual pretenden referirse. En efecto, la existencia de sistemas caóticos, si bien no implica determinismo ontológico, conduce al abandono del determinismo gnoseológico (4) aún en una versión debilitada según la cual el conocimiento del estado de cualquier sistema en un dado instante permite conocer el estado del sistema en cualquier instante posterior dentro de un margen acotado de error.

Estas peculiaridades del comportamiento caótico permiten, a su vez, señalar la diferencia entre Teoría del Caos y Mecánica Cuántica respecto del problema del determinismo. En la Teoría del Caos, las consideraciones estadísticas surgen a partir de la aplicación de la teoría de errores a la descripción dinámica del sistema. Por el contrario, en la interpretación ortodoxa de la Mecánica Cuántica, la propia función de onda expresa una probabilidad a través del cuadrado de su amplitud, y

ello sin consideración alguna a propagación de errores. Esta diferencia permite objetar aquellas afirmaciones que colocan la Teoría del Caos y la Mecánica Cuántica en un mismo nivel en cuanto al rechazo del determinismo que ellas implican: mientras la Teoría del Caos puede ser cómodamente interpretada desde una perspectiva que combina determinismo ontológico e indeterminismo gnoseológico a la manera de la Mecánica Estadística de Gibbs, la Mecánica Cuántica introduce dificultades mucho más serias debido a las cuales algunos autores prefieren adoptar una posición ontológicamente indeterminista basada en la interpretación objetiva de la probabilidad

* * *

Si la diferencia entre determinismo ontológico y determinismo gnoseológico desmiente las afirmaciones extra-científicas que suelen rodear la Teoría del Caos, el origen de la impredecibilidad en los sistemas caóticos mitiga las graves consecuencias que la teoría supuestamente implica para el método científico. En primer lugar, aún en los sistemas caóticos es posible la predicción estadística, recurso que la física ha adoptado desde fines del siglo XIX sin cuestionamiento alguno del método científico en su aspecto predictivo. En segundo lugar, la predicción unívoca de los estados futuros de un sistema caótico no resulta -dentro de márgenes acotados de error- imposible en todos los casos, sino sólo para tiempos de evolución muy superiores al tiempo de Lyapounov.

Por último, cabe recordar las numerosas aplicaciones tecnológicas basadas en el aprovechamiento del comportamiento caótico de ciertos sistemas. En lugar de evitar el caos, algunos ingenieros han explotado sus peculiares características para incrementar la potencia de láseres, para sincronizar la salida de circuitos electrónicos, para controlar las oscilaciones en ciertas reacciones químicas e incluso para estabilizar el latido errático del corazón de animales enfermos (*cfr.* Ditto & Pecora, 1993). Una de estas interesantes aplicaciones tecnológicas consiste en la codificación de mensajes para comunicación, sobre la base de la posibilidad de construir dos sistemas que exhiban exactamente el mismo comportamiento caótico en sincronía. Si la señal caótica de uno de ellos se "suma" al mensaje a codificar, sólo quien posea el segundo sistema podrá decodificar la transmisión "restando", de la señal transmitida, la señal caótica que su propio sistema produce, recuperando así el mensaje original (*cfr.* Neff & Carroll, 1993).

*

*

*

Otro aspecto que merece una especial atención es el referido a la relación entre caos y aleatoriedad. En muchos casos, la bibliografía señala el carácter aleatorio de los sistemas caóticos, introduciendo la noción de azar para su caracterización (*cf.*, por ejemplo, Davies, 1990; Prigogine & Stengers, 1990). Sin embargo, no todos comparten la misma opinión: algunos autores resaltan el orden subyacente que rige al comportamiento caótico (*cf.* Ditto & Pecora, 1993). Incluso la propia denominación de la teoría ha sido objeto de críticas sobre la base de que el término "caos" sugiere la idea de procesos completamente ajenos a cualquier tipo de regularidad: por ejemplo, René Thom prefiere utilizar el término "expansivo" en lugar de "caótico", donde el carácter expansivo alude a la divergencia exponencial de las trayectorias (Thom, 1992, p.66).

La asociación entre caos y aleatoriedad surge de ciertas definiciones de "caos" basadas en el concepto de complejidad algorítmica, tal como fue presentada independientemente por Chaitin, Kolmogorov y Solomonov. Estos autores definen la complejidad algorítmica de una secuencia de símbolos como la longitud del programa computacional más corto que puede generar tal secuencia en una máquina de Turing; la secuencia será aleatoria si posee máxima complejidad algorítmica, esto es, si el programa más corto que puede generarla tiene aproximadamente la misma longitud que la propia secuencia. Sobre esta base, algunos autores consideran que la aleatoriedad algorítmica suministra una adecuada definición para el concepto de caos. Así, Joseph Ford sostiene que:

en un sentido técnico estricto, caos es meramente un sinónimo para la aleatoriedad, tal como la teoría de la complejidad algorítmica de Andrei Kolmogorov, Gregory Chaitin y Ray Solomonov así claramente lo revela (Ford, 1989, p.350)

La estrategia de Ford consiste en dividir el espacio de las fases en celdas numeradas y asociar la trayectoria en dicho espacio con la secuencia de los números de las celdas que sucesivamente va ocupando el punto representativo del estado del sistema. Efectuado este paso, Ford establece que:

si puede demostrarse que la secuencia de los números de las celdas correspondientes a una órbita es aleatoria, entonces la órbita misma es también aleatoria (Ford, 1983, p.43)

El así definido carácter aleatorio de la trayectoria en el espacio de las fases constituye, para el autor, la manifestación del comportamiento caótico del sistema.

No obstante su precisión, esta definición del concepto de caos puede ser objetada desde una perspectiva epistemológica. En este sentido, Robert Batterman (1993) señala la insuficiente relación entre el objeto de la definición, esto es, la secuencia numérica, y el sistema que la genera: la aleatoriedad algorítmica es una

propiedad de una secuencia de símbolos, mientras que lo que se requiere es una definición de "caos" aplicable a sistemas dinámicos. La argumentación de Batterman se apoya en su propuesta de una condición de adecuación totalmente razonable para cualquier definición aceptable del concepto de caos: ninguna definición adecuada para sistemas dinámicos clásicos puede permitir que un sistema clásico integrable resulte caótico. El núcleo del problema reside en que la definición algorítmica no cumple esta condición: compárense dos "cajas negras", una conteniendo una rueda de kermesse a la cual se imparten diferentes cantidades de movimiento angular en intervalos regulares de tiempo, la otra conteniendo un gas ideal bajo el modelo de esferas rígidas; mientras el segundo sistema es efectivamente caótico, el primero constituye un sistema clásico integrable que simula una salida aleatoria. Sin embargo, la definición algorítmica de caos no diferencia entre ambas situaciones. En palabras de Batterman:

La definición de caos por complejidad algorítmica apunta a la salida de un sistema sin consideración alguna del movimiento o mecanismo que genera tal salida. [...] Considero que una definición razonable de caos debería tomar en cuenta el carácter del movimiento subyacente; por el contrario, en esta definición tal movimiento es completamente ignorado. La definición algorítmica refiere a una consecuencia del caos: la no computabilidad de la secuencia de salida (Batterman, 1993, p.63)

Es importante destacar que aquí no se rechaza la definición misma de aleatoriedad en términos del concepto de complejidad algorítmica. Lo único que se pretende cuestionar es la estrecha relación que algunos autores establecen entre aleatoriedad algorítmica e indeterminismo: un sistema puede producir una secuencia de salida algorítmicamente aleatoria aún siendo totalmente determinista respecto de su comportamiento dinámico. Este es el caso del comportamiento caótico: un sistema determinista caótico genera una secuencia de salida algorítmicamente aleatoria. En este sentido Jorge Wagensberg alerta acerca de las precauciones que deben adoptarse al asimilar caos y aleatoriedad en todo intento de argumentar en favor del indeterminismo a partir de la Teoría del Caos:

La definición que tal teoría [Chaitin-Kolmogorov-Solomonov] proporciona del azar no basta para distinguir entre el azar ontológico y el azar de la ignorancia, ni para determinar si un proceso natural es determinista o no lo es (Wagensberg, 1992, p.69)

* * *

Por último resta detenerse en el argumento en favor del indeterminismo basado, no ya en los errores experimentales en la determinación de las condiciones iniciales, sino en nuestra limitación para representar los números correspondientes a los valores iniciales de las variables de estado: si tales números son irracionales,

involucran una cantidad infinita de información para su representación, almacenamiento y utilización en cálculos; por lo tanto, el error en la determinación de las condiciones iniciales -que luego se amplificará exponencialmente debido al comportamiento caótico del sistema- no se deberá únicamente a nuestra limitada capacidad de medición, sino también a otro motivo más profundo, en principio ajeno a consideraciones empíricas. Haciéndose eco de este argumento, Ford sostiene que "el continuo numérico es, físicamente, una ficción" (1983, p.47), y propone eliminar de la recta numérica, no sólo los números irracionales (por su complejidad algorítmica máxima), sino también los racionales periódicos (pues su generación requiere la repetición infinita de un algoritmo finito), el cero (lo infinitamente pequeño) y el infinito (lo infinitamente grande):

El continuo numérico queda así reducido a un conjunto acotado y finito de puntos, el cual, sin pérdida de generalidad, puede ser considerado como un conjunto finito de enteros. Es este conjunto de números la base sobre la cual se deben reformular las teorías físicas (Ford, 1983, p.47)

Si bien éste parece ser un argumento de mayor peso que el relativo a los inevitables errores experimentales, aún son necesarias algunas precisiones. En primer lugar, la inevitable pérdida de información al representar números irracionales, si bien constituye un nuevo y fuerte apoyo para el indeterminismo gnoseológico, sigue sin afectar la cuestión ontológica. El determinista ontológico podrá replicar que tal pérdida de información no implica el carácter indeterminado del valor inicial de las variables de estado, sino únicamente la imposibilidad de su representación mediante una cantidad finita de información: dicho valor existe, es único, y el sistema evolucionará a partir de él de acuerdo con regularidades deterministas, independientemente de que nosotros podamos o no representarlo. En otras palabras, sería absurdo considerar que un mismo sistema es indeterminista o determinista según sea irracional o racional respectivamente el valor inicial de sus variables de estado.

Por otra parte, la propuesta de Ford de recortar convenientemente el continuo tampoco conduce a una interpretación indeterminista de la Teoría del Caos. Por el contrario, la eliminación de los números "conflictivos" del rango de valores de las variables de estado permitiría -dejando aquí de lado los errores experimentales- representar adecuadamente todas las posibles condiciones iniciales; en este caso, no existiría pérdida alguna de información que pudiera amplificarse exponencialmente a través del proceso caótico, generando la total impredecibilidad de los estados futuros del sistema. Además, la perspectiva de Ford presenta un inconveniente adicional: su desconfianza respecto del concepto de infinito recuerda los análogos reparos intuicionistas en el ámbito de la fundamentación de la matemática. Esta semejanza permite suponer que una matemática basada en tal recorte del continuo se enfrentaría a la misma dificultad a

la que se enfrenta la matemática intuicionista: su debilidad para la utilización en numerosas aplicaciones tradicionales de la física.

*

*

*

En conclusión, este análisis de los diversos aspectos involucrados por la Teoría del Caos en relación al problema del determinismo pone de manifiesto que la existencia de sistemas caóticos constituye un obstáculo difícilmente salvable para el determinista gnoseológico. Por el contrario, la Teoría del Caos, entendida como una teoría acerca de sistemas dinámicos e interpretada desde una perspectiva realista, constituye un excelente argumento para el determinista ontológico quien, con su ayuda, puede demostrar que muchos procesos aparentemente aleatorios y carentes de toda regularidad, en realidad responden a leyes deterministas subyacentes que permiten su inteligibilidad, si bien no la predicción unívoca para todo instante futuro.

Notas

- (1) En los textos clásicos sobre teoría del caos, como por ejemplo Schuster (1989) o Argyris *et al.* (1994), la teoría se estudia en su aplicación a ecuaciones dinámicas. Esta interpretación es la que se adoptará en el presente trabajo.
- (2) Se denomina "espacio de las fases" correspondiente a un sistema a un espacio euclídeo de tantas dimensiones como variables de estado posea el sistema; en tal espacio, cada punto representa un estado posible del sistema y, dado el punto correspondiente al estado inicial, la evolución temporal del sistema queda representada por una trayectoria que se inicia en dicho punto.
- (3) Entendemos aquí por *determinismo ontológico* la doctrina metafísica según la cual todo sistema físico es determinista, esto es, si el sistema se encuentra en un estado e_1 en el instante t_1 , las leyes físicas hacen imposible que se encuentre en un estado diferente de e_2 en t_2 (para una elucidación del este concepto de determinismo, *cfr.* Earman, 1986). Cuando hablamos de una interpretación realista de las ecuaciones diferenciales, nos referimos a la interpretación de sus soluciones como expresión de leyes inscriptas en el plano ontológico que rigen el comportamiento de los sistemas físicos, y no como meras herramientas sintácticas para la predicción.
- (4) Entendemos aquí por *determinismo gnoseológico* la posición que considera posible conocer unívocamente los estados futuros de todo sistema físico sobre la base del conocimiento de su estado actual. Si bien determinismo

gnoseológico implica determinismo ontológico, la implicación inversa no se cumple.

Bibliografía

- Argyris, J. & Faust, G. & Haase, M. (1994), *An Exploration of Chaos*, North-Holland, Amsterdam.
- Batterman, R. W. (1993), "Defining Chaos", *Philosophy of Science*, Vol.60, Nº 1, pp.43 a 66.
- Crutchfield, J.P. & Farmer, J.D. & Packard, N.H. & Shaw, R.S. (1987), "Caos", *Investigación y Ciencia*, Nº 125, Febrero, pp.16 a 29.
- Davies, P. (1990), "Chaos Frees the Universe", *New Scientist*, Vol.128, Nº 1737, Octubre, pp.48 a 51.
- Ditto, W.L. & Pecora, L.M. (1993), "Mastering Chaos", *Scientific American*, Vol.269, Nº 2, Agosto, pp.62 a 68.
- Earman, J. (1986), *A Primer on Determinism*, Reidel, Dordrecht.
- Eckmann, J.P. & Mashaal, M. (1991), "La Física del Desorden", *Mundo Científico*, Nº 115, Vol.11, Julio-Agosto, pp.722 a 730.
- Etkin, J. (1993), "El Orden Destructivo", *Oikos*, Año 1, Nº 1, Septiembre, pp.17 a 21.
- Ford, J. (1983), "How Random is a Coin Toss?", *Physics Today*, Nº 4, Abril, pp.40 a 47.
- Ford, J. (1989), "What is Chaos, That We Should Be Mindful of It?", en Paul Davies ed., *The New Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Marti, J. (1991), "Chaos Might Be the New Order", *Utne Reader*, Nº 48, Noviembre-Diciembre, pp.30 a 32.
- Martinez Nogueira, R. (1993), "El Destronamiento de la Razón", *Oikos*, Año 1, Nº1, Septiembre, pp.12 a 16.
- Neff, J. & Carroll, T. (1993), "Circuits that Get Chaos in Sync", *Scientific American*, Vol.269, Nº 2, Agosto, pp.101 a 103.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1990), *La Nueva Alianza*, Alianza Editorial, Madrid.
- Schuster, H. G. (1989), *Deterministic Chaos*, VCH, Weinheim.
- Thom, R. (1992), "Determinismo e Innovación", en Jorge Wagensberg, ed., *Proceso al Azar*, Tusquets, Buenos Aires.
- Wagensberg, J. ed. (1992), *Proceso al Azar*, Tusquets, Buenos Aires.