

# VIAJE A LA COMPLEJIDAD

1

DEL BIG BANG AL ORIGEN DE LA VIDA

Nivel de integración físico



# VIAJE A LA COMPLEJIDAD

Nicolás Caparrós y Rafael Cruz Roche (Dirs.)

1

DEL BIG BANG AL ORIGEN DE LA VIDA

Nivel de integración físico

Carmen Acedo y Antonio López (Coords.)

BIBLIOTECA NUEVA

**siglo xxi editores, s. a. de c. v.**

CERRO DEL AGUA, 248, ROMERO DE TERREROS,  
04310, MÉXICO, DF  
www.sigloxxieditores.com.mx

**salto de página, s. l.**

ALMAGRO, 38,  
28010, MADRID, ESPAÑA  
www.saltodepagina.com

**editorial anthrpos / nariño, s. l.**

DIPUTACIÓ, 266,  
08007, BARCELONA, ESPAÑA  
www.anthrpos-editorial.com

**siglo xxi editores, s. a.**

GUATEMALA, 4824,  
C 1425 BUP, BUENOS AIRES, ARGENTINA  
www.sigloxxieditores.com.ar

**biblioteca nueva, s. l.**

ALMAGRO, 38,  
28010, MADRID, ESPAÑA  
www.bibliotecanueva.es

VIAJE a la complejidad / Nicolás Caparrós y Rafael Cruz Roche (dirs.) - Madrid : Biblioteca Nueva, 2012

4 vol. ; 24 cm

ISBN: 978-84-9940-466-0

I: Del big bang al origen de la vida : nivel de integración física / Carmen Acedo y Antonio López (eds.). - 424 p.

1. Psicoanálisis 2. Epistemología 3. Filosofía 4. Ciencia I. Caparrós, Nicolás, dir. II. Cruz Roche, Rafael, dir. III Acedo, Carmen IV. López, Antonio

16 HPK

159.9 JM

001 GTR

Ilustración de cubierta: Isabel Sanfeliu

© Los autores, 2012

© Editorial Biblioteca Nueva, S.L., Madrid, 2012

Almagro, 38

28010 Madrid

www.bibliotecanueva.es

editorial@bibliotecanueva.es

ISBN: 978-84-9940-467-7

Edición digital

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs., Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

# ÍNDICE

PRÓLOGO. Rafael Cruz Roche .....	13
----------------------------------	----

## INTRODUCCIÓN GENERAL A LA OBRA

HACIA EL PARADIGMA DE LA COMPLEJIDAD. Nicolás Caparrós .....	17
Qué es un paradigma .....	17
El entorno de la filosofía .....	21
Inglaterra: Emergentismo, Proceso y Cambio .....	25
Francia: Nuevas aportaciones al pensamiento de la complejidad .	26
Las aportaciones anglosajonas .....	35
La Auto-organización y las Estructuras disipativas .....	36
Fractales .....	37
Diagrama de Feigenbaum .....	38
Aproximación histórica a los sistemas no lineales .....	39
El Instituto Santa Fe .....	40
Teorías del Caos y la Complejidad: relaciones y diferencias .....	45

## VOLUMEN I

### DEL BIG BANG AL ORIGEN DE LA VIDA: NIVEL DE INTEGRACIÓN FÍSICO

MAPA DEL PRIMER VOLUMEN. Isabel Sanfelix .....	52
--	----

### CAPÍTULO 1: LA EPISTEMOLOGÍA

REFLEXIONES EPISTEMOLÓGICAS SOBRE LOS SISTEMAS COMPLEJOS. Grégoire Nicolis y Catherine Nicolis .....	55
Complejidad, causalidad y azar .....	55
Complejidad e historicidad .....	57
Complejidad y reduccionismo .....	60
El futuro de la complejidad .....	63

EL PRIMER BUCLE EPISTEMOLÓGICO EN LA TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD. Edgar Morin ..... 64

    Articulaciones y comunicaciones ..... 64

EL MÉTODO CIENTÍFICO. Carmen Acedo ..... 68

    Las teorías científicas ..... 70

    El principio de objetividad ..... 72

NIVELES DE INTEGRACIÓN. Nicolás Caparrós ..... 74

    Filosofía, el proceso evolutivo y niveles de integración ..... 76

    Los diferentes niveles de integración ..... 83

    Hipercomplejidad ..... 85

ESPACIO O ESPACIOS. Andrés Perea ..... 86

    Espacio Literario ..... 87

    Espacio Plástico ..... 87

    Los sonidos y aromas del espacio ..... 88

    Ma ..... 92

    Espacio arquitectónico ..... 93

TIEMPO O, ACASO, TIEMPOS. Nicolás Caparrós ..... 94

    Concepciones, creencias, y desarrollos del tiempo ..... 94

    Los mitos del Caos ..... 96

    La medida del tiempo, la faz del tiempo ..... 98

    La trascendencia y el tiempo ..... 100

    El horizonte filosófico ..... 102

    Y, por fin, el Tiempo como Proceso ..... 109

CAPÍTULO 2: TEORÍAS DE LA COMPLEJIDAD

DINÁMICA NO LINEAL: ORÍGENES Y FUTURO. Miguel A. Fernández Sanjuán y José Manuel Casado Vázquez ..... 111

    Introducción ..... 111

    DNL e interdisciplinariedad ..... 111

    Aproximación histórica a la DNL ..... 113

    La Física y la Teoría del Caos ..... 115

    Algunos avances recientes en DNL ..... 122

LINEAL/NO LINEAL. Nicolás Caparrós ..... 123

    Un comienzo ingenuo ..... 123

LA FENOMENOLOGÍA DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS. Grégoire Nicolis y Catherine Nicolis ..... 125

    La complejidad, un nuevo paradigma ..... 125

EL EPISTEME DEL EMERGENTE. PRÓLOGO AL CONCEPTO. Nicolás Caparrós ..... 145

LO EMERGENTE. Edgar Morin ..... 148

    El todo es más que la suma de las partes ..... 148

    Las emergencias globales ..... 149

    Las micro-emergencias (la parte es más que la parte) ..... 150

    La realidad de la emergencia ..... 150

La emergencia de la realidad .....	152
La emergencia de la emergencia .....	153

### CAPÍTULO 3: TEORÍA DEL CAOS

CIBERNÉTICA: EN LA ENCRUCIJADA DE LA TEORÍA GENERAL DE LOS SISTEMAS.	
Nicolás Caparrós .....	155
TEORÍA GENERAL DE LOS SISTEMAS. Nicolás Caparrós .....	156
Antecedentes .....	156
Heinz von Foerster y la auto-organización .....	160
CAOS: HISTORIA Y DESARROLLO. Nicolás Caparrós .....	163
Feedback (Retroalimentación) .....	165
Teoría del Caos .....	166
EL CAOS Y LO CUÁNTICO. Ian Stewart .....	172

### CAPÍTULO 4: LA MATEMÁTICA: CREACIÓN Y SISTEMA. UNA AVENTURA INCONCEBIBLE DEL PENSAMIENTO

HISTORIA DE LAS MATEMÁTICAS: EL PROCESO HACIA EL MUNDO DE LO COMPLEJO.	
Nicolás Caparrós .....	185
Unas reflexiones para comenzar .....	186
Babilonia .....	186
Grecia y Egipto .....	187
Escritura y cálculo .....	188
La Matemática Medieval .....	189
Edad Moderna .....	190
La estadística. El azar, lo probable, lo posible .....	193
Ley de los grandes números; la mecánica estadística .....	195
Nuevos horizontes .....	202
CADENA DE MARKOV. Antonio López .....	205
REDES BAYESIANAS. Antonio López .....	206
TEORÍA DE LOS NÚMEROS. Pablo Amster .....	209
Cartas a un joven matemático .....	210
El Fermat grande se come al chico .....	212
El objetivo inmediato de mi investigación .....	214
COMPLEJIDAD MATEMÁTICA: NUEVOS HORIZONTES, NUEVOS CONCEPTOS. Nicolás Caparrós .....	
Henri Poincaré o el vértigo delo espacial .....	227
El fantasma de la Certidumbre .....	234
INFINITO. Nicolás Caparrós .....	235
Infinito e infinitos .....	239
LA COMPLEJIDAD DE LA INFORMÁTICA Y LA COMPLEJIDAD EN INFORMÁTICA. Antonio Vaquero .....	
La complejidad en Informática .....	241

La complejidad de la Informática .....	242
Colofón .....	248

## CAPÍTULO 5: MECÁNICA CLÁSICA

INERCIA, FUERZA Y LEYES DEL MOVIMIENTO. Carmen Acedo .....	249
Los conceptos de inercia y de fuerza .....	249
Las leyes del movimiento .....	254
LA FÍSICA DEL CALOR. Carmen Acedo .....	257
Antecedentes .....	257
La naturaleza del calor .....	259
El primer principio o la ley de la conservación de la energía .....	264
El segundo principio o Segunda ley .....	267
La Entropía .....	269
La flecha del tiempo y la degradación de la energía .....	275
ARTICULACIÓN DEL SEGUNDO PRINCIPIO CON LA ENTROPÍA EN EL PRINCIPIO DE LA COMPLEJIDAD FÍSICA. Edgar Morin .....	277
El primer principio cosmológico y el segundo principio termo- dinámico .....	277
El segundo principio de una organización sin principio: la inte- gración en una fisis generalizada .....	278
El anverso y el reverso .....	279

## CAPÍTULO 6: RELATIVIDAD, COSMOLOGÍA

SER O DEVENIR. LA DINÁMICA: UNA CUESTIÓN DE MOVIMIENTO. Nicolás Caparrós .	283
BIG-BANG. Nicolás Caparrós .....	285
El comienzo .....	285
Evolución del universo .....	287
La incompatibilidad entre la Mecánica Cuántica y la Relativi- dad General .....	288
Requerimientos de una teoría cuántica de la gravedad .....	293
SOBRE LA RELATIVIDAD: EL ESPACIO-TIEMPO. Nicolás Caparrós	
Tiempo o Tiempos .....	295
La teoría de la relatividad y el tiempo .....	297

## CAPÍTULO 7: MECÁNICA CUÁNTICA: DONDE LA COMPLEJIDAD ALCANZA PLENO SENTIDO

MECÁNICA CUÁNTICA. Nicolás Caparrós .....	305
Interludio filosófico .....	306
LAS CONSTANTES DE LA FÍSICA Y LA MATEMÁTICA. Nicolás Caparrós .....	310
Constantes dimensionales y adimensionales .....	310



Las constantes físicas y la vida en el Universo .....	311
MÁS ALLÁ DE LA IMAGINACIÓN: EL MUNDO QUE DESVELÓ PLANCK. Nicolás Caparrós .....	312
SIGUE LA DISCONTINUIDAD: LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES. Nicolás Caparrós ..	317
Composición y descomposición de la materia .....	317
Siempre más allá; otras familias .....	322
El Universo delirante de Paul Dirac .....	323
El presente inestable donde materia y energía construyen un laberinto .....	324
LA DUALIDAD ONDA/PARTÍCULA: ECUACIÓN DE SCHRÖDINGER. Nicolás Caparrós .....	325
EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE W. HEISENBERG. Nicolás Caparrós .....	336
El enunciado .....	336
La historia .....	336
La Interpretación de Copenhague .....	338

## CAPÍTULO 8: SIMETRÍA, FUNDAMENTOS DE LA COMPLEJIDAD

CUASI-OBJETO; CUASI-SUJETO. HACIA LA SIMETRÍA. Nicolás Caparrós .....	349
SIMETRÍA, UN LARGO PROCESO. Nicolás Caparrós .....	353
Grupos en la matemática .....	353
Simetría y Grupos .....	353
Principio de Simetría .....	356
Simetría, Simetrías, Rupturas .....	359
Otra vez el Grupo. Grupo conexo de invariancia geométrica de la física .....	360
LAS RUPTURAS DE SIMETRÍA. Nicolás Caparrós .....	367
Ruptura de Paridad .....	370
GEOLOGÍA Y SIMETRÍA. Victoria López-Acevedo Cornejo .....	372

## EPÍLOGO

MATEMÁTICAS Y ESTÉTICA. Pablo Amster .....	377
Relato .....	377
Términos, definiciones, axiomas, teoremas .....	381
La matemática no es el arte .....	385
PERFECCIÓN Y SIMETRÍA DAN BELLEZA, PERO NO HAY INTELIGENCIA SIN ERRORES, Y SIN SIMETRÍAS ROTAS NO HUBIESE HABIDO EVOLUCIÓN. Manuel García Velarde .....	390
Rupturas de Simetría. Imperfección y proceso .....	391
BIBLIOGRAFÍA .....	401

## COLABORAN EN ESTE VOLUMEN

CARMEN ACEDO, Física. Informática. Psicoanalista.

PABLO AMSTER, Ph. D. Matemático. Facultad de Ciencias Exactas, Buenos Aires. Investigador del CONICET.

NICOLÁS CAPARRÓS, Ph. D, MD. Psiquiatra, Psicoanalista. Miembro de EspaceAnalytique. Presidente de Honor de SEGPA.

JOSÉ MANUEL CASADO VÁZQUEZ, Ph. D. Grupo de investigación: Dinámica Estocástica y Cuántica Aplicada. Catedrático de física atómica, molecular y nuclear.

RAFAEL CRUZ ROCHE, Ph. D. MD. Psiquiatra, Psicoanalista, Ex-presidente de la Asociación Psicoanalítica Madrileña

MIGUEL ÁNGEL FERNÁNDEZ SANJUÁN, Ph. D. Físico. Catedrático de Física Aplicada, Universidad Rey Juan Carlos. Investiga Sistemas Dinámicos No Lineales.

MANUEL GARCÍA VELARDE, Académico de número de la Real Academia de doctores de España. Catedrático de física. Director del Instituto pluridisciplinar de la Universidad Complutense, Madrid. Dr. Honoris Causa por la Univ. De Aix-Marsella.

ANTONIO LÓPEZ, Físico, Informático.

VICTORIA LÓPEZ ACEVEDO, Ph. D. Geóloga. Profesora Titular. Dpto. Cristalografía y Mineralogía.Fac. Ciencias Geológicas UCM.

EDGAR MORIN, Director de investigaciones emérito en el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS) de Francia. Doctor *honoris causa* por v24 universidades de todo el mundo.

CATHERINE NICOLIS, Ph. D. Física. Royal Meteorological Institute of Belgium. Centro interdisciplinar de Fenómenos No Lineales y Sistemas Complejos (Bruselas)

GREGOIRE NICOLIS, Ph. D. Físico. University of Brussels, Bélgica. Premio Théophile De Donder de la Académie Royale de Bélgica (1970). Miembro de la Academia Europea de las Ciencias. Responsable del Centro interdisciplinar de Fenómenos No Lineales y Sistemas Complejos (Bruselas).

ANDRÉS PEREA, Ph. D.Arquitecto, Profesor de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid y de la UEM.

IAN STEWART, Ph. D. Matemático. Catedrático y Profesor emérito Universidad de Warwick. Inglaterra. Miembro de la Royal Society. Medalla Michael Faraday (1995).

ANTONIO VAQUERO SÁNCHEZ, Ph. D. Catedrático de la UCM (Área de lenguajes y sistemas informáticos) (1983). Profesor agregado de Física industrial (informática) de la UCM (1976)

## PRÓLOGO

*Rafael Cruz Roche*

Cuando la ciencia se ve obligada a abandonar el paradigma científico de Galileo ante el reto de los múltiples objetos de estudio, crea en la última mitad del siglo XX un nuevo paradigma que podemos incluir en la denominación genérica de *Teoría de la Complejidad*, con implicaciones y orígenes diversos: no-linealidad, caos determinista, auto-organización, atractores, fractales, etc. El paradigma de Galileo, y de la ciencia positivista, que se ha revelado fecundo y creativo, se caracteriza por la reducción de ciertos aspectos de la Naturaleza a fenómenos y comportamientos más simples, que permiten su estudio y repetición en un intento, fructífero repito, de evitar las contaminaciones que depara la presencia del observador. Desde la perspectiva actual, esta reducción es compatible con formas de funcionamiento mental del ser humano de práctica universalidad entre nosotros, me refiero sobre todo al modo intelectual que prescribe la lógica aristotélica, o a lo que posteriormente en psicoanálisis se ha denominado proceso secundario. Serían aquellos aspectos de conexión con la realidad, o con ciertos aspectos de la realidad externa (*mesocosmos*) que están fuertemente impresos en nuestras redes neuronales y más libres de las influencias individuales debidas al medio cultural y a la historia personal del sujeto.

Cuando los objetos de estudio se van haciendo más complejos y/o la ambición exploradora de la ciencia intenta dar cuenta de espacios más significativos de los mismos, más allá de lo fácilmente reducible, es necesario establecer un nuevo paradigma, en realidad el nuevo paradigma se construye solo. A la postre todos los objetos y fenómenos implican aspectos complejos que desbordan la capacidad reduccionista de la ciencia clásica. Así las ciencias duras en su evolución finalmente se ven abocadas a tolerar el «fin de las certidumbres» (Prigogine), la imposibilidad del determinismo propio de la causalidad lineal.

El advenimiento de la física cuántica enfrenta a la utopía de un conocimiento sin la distorsión de la presencia del observador, la psicología freudiana enseña la total implicación del objeto, lo observado, en la propia constitución del psiquismo y, el inevitable desarrollo de la teoría darwinista de la evolución, plantea una concepción de lo psíquico en cuanto aparato de conocimiento como aparición adaptativa de internalización de la realidad (el pensamiento, dirá Lorenz, es una acción en el espacio imaginado). Todo ello lleva a la inevitable tarea de intentar comprender la realidad y el sujeto con su aparato del conoci-

miento como un todo único, interrelacionado y en continuo proceso de incremento de complejidad. Así, aparece la inevitable limitación del saber; como dice Wilson, el psiquismo no fue desarrollado para enfrentarse a estos problemas tan complejos, ni a la macro o microfísica, ni al propio aparato mental, surgió hace mucho tiempo para lograr una mejor adaptación del cazador recolector a su entorno cotidiano y obtener de él los mejores resultados adaptativos. Nuestra capacidad mental está lejos de ser diseñada para poder captar determinados aspectos de la realidad; por ello tantas teorías actuales se alejan de una comprensión intuitiva y tenemos que acudir a otras formas de conocimiento.

Por otra parte, el origen neoténico del ser humano, la extrema dependencia fundamental de nuestro origen dual, en una suerte de simbiosis primaria con el objeto materno, hacen que la individualidad se convierta en un bien extremadamente precioso cuya pérdida algunos consideran una forma de muerte psíquica. El individuo exige mantener cierta distancia con la realidad externa, para poder manejarse con ella, de no ser invadido por ella; de ahí que en el proceso de internalización de la misma, que supone la creación de las teorías éstas se constituyen inevitablemente en una suerte de representación fantasmática, distante y poco fiel de dicha realidad. Nuestra constitución sensorial implica una delimitación acerca de qué aspectos del exterior podemos percibir. Como formuló taxativamente I. Kant, la realidad es insensible e incognoscible *per se*. Evidentemente, a ello hemos de añadir que existen ciertos semblantes de la realidad que, por su complicación y extensión, sobrepasan la capacidad de nuestro aparato cognitivo; curiosamente cuando el propio aparato mental se convierte en el objeto del conocimiento las limitaciones son tan intensas que para algunos pensadores actuales, como J. Searle, resultan insuperables.

Por todo ello, hablamos del *Viaje a la Complejidad*, viaje de caminos inciertos y de destino seguramente imposible pero de gran fecundidad en su recorrido. Como dijo el Dante: *che no men che sappere dubbiar m'agratta*. A la postre ha de ser el lector el que desde su capacidad e intereses tenga que hacer su propia síntesis desde los muy diversos aportes que en esta obra les proponemos. La creatividad, matriz indispensable para el desarrollo del conocimiento tiene inevitablemente que intentar unir y compatibilizar aspectos de la realidad que previamente habíamos creído que eran muy distantes y distintos. Cuántas veces ideas y conceptos provenientes de campos muy diferentes pueden iluminar nuestros esfuerzos de conocimiento.

Fieles a una concepción amplia de la complejidad la propuesta es abierta, incierta y parte desde planteamientos muy diversos de la realidad, aunque siguiendo nuestra orientación profesional hemos privilegiado los planteamientos psíquicos desde una perspectiva psicoanalítica, ya que además consideramos el psiquismo como la expresión más compleja de la realidad que dicho psiquismo puede enfrentar y por tanto lugar muy idóneo para intentar el desarrollo de ese pensamiento complejo que nos propuso en su día E. Morin.

# Introducción General a la Obra

HACIA EL PARADIGMA DE LA COMPLEJIDAD



## HACIA EL PARADIGMA DE COMPLEJIDAD

*Nicolás Caparrós*

Toda la visión moderna del mundo reposa sobre la ilusión de que las pretendidas leyes de la naturaleza son la explicación de los fenómenos naturales.

*Tractatus L. Wittgenstein*

### QUÉ ES UN PARADIGMA

Se entiende en ciencia por paradigma al objeto que consigue una mayor articulación y especificación en condiciones nuevas o más rigurosas. Según manifiesta Th. Kuhn (1962), la aceptación de una teoría frente a otra anterior no se produce por la circunstancia de que ésta se comporte mejor ante cuestiones científicas, ni mucho menos porque enfrentada a la precedente, consiga refutarla. El cambio de paradigma obedece al hecho de que la nueva teoría plantea problemas distintos a los que han surgido antes. La percepción del entorno, a influjo del nuevo paradigma también difiere y las preguntas que se formulan son otras. Kuhn (1963) sintetiza sus ideas así:

Cuando los paradigmas entran, como deben, en debate sobre cuál de ellos elegir, su rol es necesariamente circular. Cada grupo usa su propio paradigma para argumentar su defensa [...] este problema de elección de paradigma nunca puede ser, inequívocamente, fijado solo por lógica o por experimentos. (pp. 93).

Kuhn continúa:

En los argumentos parciales y circulares que regularmente resultan, cada paradigma habrá mostrado satisfacer más o menos los criterios que dictan para sí... pero dado que aún ningún paradigma resuelve todos los problemas que estos definen y ninguno de los dos paradigmas deja los mismos problemas sin resolver, los debates sobre estos siempre involucran la pregunta: ¿qué problema es más significativo haber resuelto? Esa pregunta de valores solo puede ser contestada en términos de criterios que se encuentran fuera de la ciencia en su conjunto, y es este recurrir a criterios externos lo que hace a los debates sobre paradigmas ser revolucionarios. (p. 109).

Una consecuencia de este rompimiento es que el cambio de paradigma no puede ser racionalmente justificado, (Purtill 1967, pp. 54). De esta manera, Kuhn conducía, como expresó Rorty (1996, pp. 77), a socavar la distinción entre *episteme* y *doxa*. Su contribución al campo de la sociología del conocimiento fue notable, pues su trabajo hacía del corazón de la investigación científica una actividad más social de lo que se pensaba anteriormente. Lakatos in-

terpretaba la obra de Kuhn como una postulación de la irracionalidad de los grandes cambios científicos (1970, pp. 118); mientras que Kuhn lo negaba, aceptando, cuando mucho, que aquello que proponía era cambiar la noción corriente acerca de lo que por racionalidad se entendía (Kuhn 1970, p. 139).

Imre Lakatos publicó en 1970 «Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales». A diferencia de Kuhn, concibe el progreso de la ciencia en términos de programas coherentes de investigación en lugar de teorías aisladas que compiten entre sí y defiende que la historia de la ciencia debería aprender de la filosofía de la ciencia y viceversa. Su proyecto se describe así:

Será argumentado que: (a) la filosofía de la ciencia provee metodologías normativas en cuyos términos los historiadores reconstruyen la *historia interna* y de ese modo proporciona una explicación del crecimiento del conocimiento objetivo; (b) dos metodologías en competencia pueden ser evaluadas con la ayuda de la historia (normativamente interpretada); (c) cualquier reconstrucción racional de la historia necesita ser complementada con una historia externa empírica (socio-psicológica) [...] la historia interna, así definida, es primaria, y la historia externa solo secundaria. De hecho, en vista de la autonomía de la historia interna (pero no de la externa), esta última es irrelevante para el entendimiento de la ciencia. (Lakatos 1970a, pp. 91-92).

Para este autor el progreso de los programas de investigación se produce en tanto que su crecimiento teórico anticipa el empírico, cuando predice nuevos hechos con cierto éxito. Los programas se estancan si su crecimiento teórico queda rezagado tras la empiria, si solo aporta explicaciones *post-hoc* de hechos anticipados o descubiertos en un programa rival (Lakatos 1970a, pp. 100). Si un programa explica más que otro, le suplirá y el rival puede ser eliminado; si un experimento es crucial o no, o si una hipótesis es altamente probable a la luz de la evidencia disponible o no, no depende lo más mínimo de las creencias de los científicos, de su personalidad, o de su autoridad. Estos factores subjetivos no son de interés para ninguna historia interna (Lakatos 1970a, pp. 106). Con Lakatos el cambio científico, en resumen, es ante todo racional.

### *Generalidades*

Como no podía ser de otra manera, el paradigma de la complejidad se ha construido poco a poco. Hace veinte años existían una serie de interesantes y dispersas disciplinas que ofrecían nuevos horizontes, pero faltaba la necesaria articulación entre ellas que permitiese vislumbrar un acontecimiento más global que lo que parecían anunciar cada uno de estos desarrollos por separado.

Por un lado, las tesis de la causalidad, que ya habían sufrido desde mucho antes serios embates, pasan a ser modelos simplificados de algo de mayor calado o devienen en casos particulares que escapan a leyes de tipo más general. De este modo, los *sistemas dinámicos no lineales*, revelan realidades nuevas que encajan mejor con los problemas y preguntas de la ciencia que se formulan, sobre todo, en la segunda mitad del siglo XX.



La mecánica cuántica, entre 1920 y 1930, significó el primer aldabonazo que conmovió los cimientos de la física; por esa misma época, la matemática exploró incertidumbres e inexactitudes que hasta ese momento habían encontrado escaso eco y que en algunos casos quedaron relegadas al indigno e inútil lugar de las curiosidades. Tal fue, por ejemplo, el caso de muchas de las aportaciones de Poincaré que solo cobraron pleno sentido muchos años después. También el de los conjuntos de Julia. La conjetura de Poincaré merece una mención especial (D. O'Shea 2007).

Los *sistemas dinámicos no lineales* ofrecen dos particularidades enojosas e interesantes a un tiempo:

- 1) Presentan patrones identificables de comportamiento.
- 2) Son impredecibles a largo plazo.

La sempiterna y confortable predictibilidad resultó engañosa. Así, por ejemplo, las órbitas de los planetas de nuestro sistema solar no son inmutables, aunque tal pareciera como proclamara Kepler. La razón reside en que son extremadamente sensibles a las condiciones iniciales. La perplejidad primera pronto se sustituyó por nuevas metas; fue necesario *identificar patrones de comportamiento de esos sistemas no lineales*, ese objetivo desvió la atención hacia el tipo de *interacciones* que operan entre los elementos de ese sistema, lo que convoca la *emergencia* de propiedades nuevas. Estas propiedades emergentes no obedecen al principio de reducción; es decir, no son explicables desde los elementos que las producen. Con la debida cautela, diremos que este giro ha situado a la investigación en un mayor contacto con lo real, con ese *objeto en sí* que preconizó Kant; pero, al tiempo, la pesquisa se torna más humilde; parece que hemos dado un salto atrás desde la explicación que se extraía de la causalidad a la descripción cautelosa, y no siempre fácil, de los sistemas.

Hoy por hoy, carecemos de leyes generales de la complejidad, contamos solo con leyes sectoriales que no satisfacen a la totalidad de la problemática con la que se enfrenta el nuevo paradigma. Un panorama similar al que los físicos arrostran en su búsqueda de la Teoría unificada.

Los últimos años del siglo XX atisbaron los nuevos horizontes: «Tres siglos después de Newton, la ciencia experimenta un cambio radical de perspectiva», (Prigogine 1997b). En ese mismo texto el autor define, de manera sucinta y clara, los objetivos de este naciente paradigma: «*reconocer* la complejidad, *hallar los instrumentos para describirla* y efectuar una *relectura* dentro de este contexto de las relaciones cambiantes del hombre con la naturaleza», (ibid., p. 48; las itálicas son nuestras).

La Teoría de la Complejidad depara a cada instante problemas desconcertantes, muchos de ellos provienen, a buen seguro, de que todavía estamos lejos de alcanzar generalizaciones consistentes, faltos aún de leyes con el suficiente grado de abstracción. Cumple decir que en la actualidad existen diversas teorías de la complejidad de carácter sectorial porque ya contamos con una forma de contemplar problemas científicos que difiere de la perspectiva reduccionista.

En física y matemáticas existe una teoría de la complejidad. Igual sucede en biología y también en las teorías de la evolución. La sociología también cuenta con desarrollos propios y, poco a poco, esta perspectiva cobra fuerza en campos como la psicología y el psicoanálisis.

Es de hacer notar que las disciplinas pioneras en aceptar este cambio han sido las que tradicionalmente se denominan *ciencias duras*: la matemática y la física; las ciencias psicosociales han ofrecido una mayor resistencia, quizá por su menor seguridad en sí mismas.

### *La primera andadura*

Pensé en titular este ensayo «El paradigma de la complejidad», así, a secas. Al hacerlo de este modo parecía estar frente algo cumplido, como un «cadáver exquisito» y todo esto antes incluso de que hubiese tomado carta de naturaleza. Rafael Alberto Pérez me señaló, con justeza, que ese nombre iba contra la entraña misma de nuestro propósito, de las ideas esenciales del episteme de lo complejo –y del paradigma mismo de la complejidad–. Nada más incierto, nada más sugerente; nada más abierto y menos dogmático que este palpito que se anuncia y que aún posee un contorno titubeante.

Hace años Kuhn había escrito:

La adopción de un nuevo paradigma exige redefinición de la ciencia correspondiente. Algunos problemas antiguos son relegados o declarados *no científicos*. Otros, previamente inexistentes o triviales pueden, con el nuevo paradigma, convertirse en los arquetipos reales de significativos logros científicos.

Pero una búsqueda crispada conduce a caminos sin salida o a soluciones apresuradas. Por definición, esta debe ser: vaga, abierta, brumosa, indeterminada, si queremos que la linealidad clásica, la linealidad inexorable y operativa pero sectorial, sea revisada desde sus mismos cimientos para dejar paso a otros enfoques que la complementen.

Albergamos una idea de lo complejo que discurre a medio camino entre lo vulgar y lo intuitivo. Complejidad no significa el ocaso de la ciencia clásica sino una prolongación natural de la misma.

Sigamos: ¿es, acaso, esta reciente perspectiva un reflejo del tiempo en que vivimos, en cuanto proporciona testimonio actual del pensamiento, tecnología, aspiraciones, desarrollo armónico, contemplaciones filosóficas y rumiaciones científicas? ¿O quizá representa un auténtico emergente que se anuncia sin ruido, que rompe con presura con el orden establecido?

La incitación más socorrida es establecer *desde ya* unos referentes definitivos que sirvan como rampa de lanzamiento para el desarrollo de lo complejo. No es así, no debe serlo. Urge huir de la confusión entre el trayecto que roturó la historia «del descubrimiento de lo complejo», un hallazgo que nunca tuvo una inauguración precisa, con la premonición mágica de que «el descubrimiento de lo complejo» estaba predeterminado, cuando la realidad es que el sentido de la complejidad se alcanza *après coup*. El verdadero relato se tejó en la con-

currencia de conjeturas, deducciones y contingencias, en ese tránsito impredecible en el que discurren las ciencias. La *epistemología genética* es la guía más segura para hollar este problemático territorio. Esta dicta que *el conocimiento es un fenómeno adaptativo*, como tal en permanente cambio.

La ciencia moderna intenta ser «ciencia de la complejidad», pero es el *episteme de la complejidad* quien debe dar sentido a esta. Lo complejo abre un espacio gnoseológico donde, contra una interpretación superficial, no vale todo sino que establece el peso de la duda, de la paradoja, de la incertidumbre y, en este último caso, no como señal de insuficiencia de nuestros conocimientos, sino como afirmación ante la imposibilidad de alcanzar ese ansiado sueño que las ciencias tradicionales denominan *control*. No está claro si ha sido la Tecnología o la Ciencia misma quien ha perseguido el absoluto del control. Newton y Leibniz se dieron de bruces desde lugares diferentes, en la misma época, con el fantasma tangible de lo *inexacto*. Los ejemplos se multiplican. La búsqueda, hasta ahora estéril, de cómo predecir la aparición de los diabólicos números primos, la vieja ambición de la cuadratura del círculo. ¿Insuficiencia del conocimiento o límites inexorables de la exactitud? Averiguarlo es el reto.

La atalaya –no digamos aún paradigma– de la complejidad supone el ocaso del centro rector único; en su lugar, nacen nudos locales que sustituyen al gran diseño global del conocimiento del mundo; es el ocaso de la universalidad de lo lineal. Muchos pensadores a lo largo de la historia han expresado este sentir. Pero desde la segunda mitad del siglo XX surge una toma de conciencia de esta situación. *La filosofía piensa, la ciencia comprueba, el arte se regocija*.

## EL ENTORNO DE LA FILOSOFÍA

Vivir de muerte, morir de vida. (Heráclito)

Historia, epistemología genética. Si somos fieles al genio de lo complejo, cumple abandonar el clásico discurso que discurre entre orígenes, desarrollo y efectos para abordar la cuestión del *orden/desorden* en la complejidad desde su propia entraña. Eso harán H. Atlan, E. Morin, S. Kauffman, Ch. Langton, S. Strogatz, D. Ruelle y otros muchos desde puntos de partida distintos.

En la más antigua filosofía alientan ya estas cuestiones. Tome el lector como devaneos y no como fuentes primordiales estos anuncios hechos desde hace tanto tiempo. Heráclito (500 a. C.) nacido en Éfeso –ciudad que existió cerca de la moderna Kusadasi, Turquía– enuncia las primeras paradojas que serán inseparables acompañantes de la complejidad. Los hechos están en *cambio constante* animados por una suerte de flujo universal, los opuestos coinciden – la unidad de los opuestos– y el *Fuego*, esa forma inaprensible, es el elemento básico. El Fuego era conocido hace unos 500.000 años. No deseo hablar en términos absolutos, pero este elemento despertó, a buen seguro, el terror por la contemplación de lo inesperado. El fuego expresa la transición del pensamiento

mágico al pensamiento concreto, más tarde, el control y con él un acceso a lo simbólico, con las miserias y grandezas que ello encierra.

Tales de Mileto (639-547 a. C) había proclamado el Agua como elemento básico. Fuente de vida.

El Aire será elegido por Anaxímenes (585-524 a. C). Aire: lugar vertiginoso en una eterna e indiferente calma.

Heráclito de Éfeso (535-475 a. C) piensa que el Fuego es el principio de todas las cosas. Fuego: dinámica de la Forma, Proceso, Energía intuida...

Empédocles (495-430) añadirá más tarde la Tierra. Tierra: hito del lejano *Big Bang*, lugar donde la energía se aquieta y aguarda.

Dejo al lector la reflexión del por qué de esta secuencia temporal:

Agua – Aire – Fuego – Tierra.

Platón, en el *Timeo*, con su particular cosmogonía, representa el fuego mediante un tetraedro regular, constituido por «bellos triángulos equiláteros» que provienen de la reunión simétrica de seis rectángulos. El filósofo intenta aportar orden e idealización subyacentes al desorden caprichoso de la superficie.

Una apresurada reflexión: Agua y Aire están estrechamente ligados, aun sin conciencia de ello, por la *necesidad*; para nuestra sorpresa, la Tierra queda al final, quizá por su obvia y eterna presencia. ¿Será precisa cierta dosis de reflexión y distancia para reparar en eso tan próximo y evidente que es la Tierra?

Queda el Fuego, que exige un análisis aparte.

La Tierra está; Agua y Aire se necesitan. El Fuego sobrecoge primero y abre paso más tarde a la acción; a la acción pensante, a la acción humana.

Descartes (1596-1650) no es ajeno a los «obstáculos del fuego» y prefiere considerarlo en lugar de *elemento* como un *fenómeno*; es decir, algo provocado por el movimiento de la *materia sutil*. ¿Cómo encajarlo si no en su cosmovisión *res cogitans-res extensa*? Contra los atomistas –que a su manera postulan algo indivisible- Descartes no encuentra razón alguna para pensar que los elementos –átomos- no puedan dividirse de manera indefinida, estos son granos y polvo en vórtices que giran en un fluido que todo lo impregna. Divisible/Indivisible es una cuestión que hoy aún persiste, aunque de forma bien diferente a cómo Descartes la consideraba entonces. Pensemos, por ejemplo, en la actual Teoría de las Cuerdas.

En la línea de lo «fenoménico» H. Boerhaave (1668-1738), un científico impar y heterodoxo, gracias a cuyos oficios la química emerge de la alquimia, demostró, en una serie de experimentos que duraron varios años, que la *materia ignea* carece de peso y que una masa de hierro pesa lo mismo a la temperatura ambiente que cuando está al rojo. El fuego es esa cosa desconocida, dirá Boerhaave, que posee la propiedad de penetrar en todos los cuerpos sólidos o fluidos y de dilatarlos, ocupando entonces un volumen mayor. Es una *materia imponderable*. R. Boyle (1627-1691) sostiene más tarde que los átomos del *calórico* poseen peso.

*Calórico...*, he aquí una nueva noción en esta deriva que dura ya dos milenios. Hasta el siglo XIX se explicaba el efecto del ambiente en la variación de la temperatura de un cuerpo por medio de un *fluido invisible llamado calórico*, que se producía cuando algo se quemaba; además pasaba de un cuerpo a otro. Cuanto más elevada fuera la temperatura de la sustancia, esta poseía mayor cantidad de *calórico*. Benjamin Thompson (1753-1814) y James Prescott Joule (1818-1889) dieron después un salto cualitativo al proclamar sucesivamente que *el trabajo podía convertirse en calor* o en un *incremento de la energía térmica*, determinando así que era *otra forma de la energía*.

### *De vuelta al fuego*

Este largo interludio permite rescatar las hipótesis de Heráclito en un *a posteriori* que induce a la reflexión. Heráclito fue no convencional, también moderno y, por lo hermético, muy difícil de asimilar para las sucesivas *mutaciones* del conocimiento que desde entonces hasta el presente han sido. A la hora de juzgarlo, las mentes pasadas y actuales arrojan juicios contradictorios sobre su pensamiento: ¿un monista, filósofo del proceso, cosmólogo, un metafísico, o quizá alguien arrastrado por la religión? Se le ha tachado de empírico, racionalista y también de místico. Todo y nada en forzada síntesis. El filósofo no se deja atrapar; apunta ante todo al viraje fundamental que traslada la atención de los asuntos del cielo a los de la tierra. Huérfanos de dioses, el tránsito se anuncia incierto y empeñoso, como otra salida del Paraíso hacia una realidad dudosa. «El mensaje no me pertenece, es una verdad eterna que resulta accesible a los que atisban la forma en que el mundo es», dirá Heráclito. Como pretendido precursor de Aristóteles, hay quienes piensan que anuncia la lógica formal o incluso que fue un *negador ingenuo del principio de la no-contradicción*.

La realidad es más compleja.

### *El logos*

Dentro de este dinamismo expresado en la *lucha de contrarios* alienta el pensamiento de Anaximandro (610-546) y, como éste, necesita de la existencia de un elemento encargado de posibilitar esta contienda. Surge el *Logos*, afirma la existencia de un *arkhé*, naturalmente, un elemento dinámico que será el *Fuego*. La filosofía se divide en sendas que parecen inconciliables. Parménides (540-450 a. C) proclama que *El Ser es y el No-Ser no es*. Aseveración que implica que *el Ser existe y el No-Ser no existe*. Enuncia la existencia de un único Ser que es *esférico, eterno, indiferenciado, inmutable y perfecto*. ¿No se atisba acaso el cosmos de Paul Dirac?

### *La polémica Heráclito-Parménides*

Hasta que Aristóteles la zanje de manera provisional, la pugna entre Heráclito y Parménides sobre el cambio, será un tema crucial en filosofía.

El enfrentamiento pone al terreno filosófico en una encrucijada: si el movimiento es posible –Heráclito–, nada es cognoscible y si no lo es –Parménides– tampoco se puede conocer nada. La clave fundamental de la superación del enfrentamiento Heráclito-Parménides es hacer compatibles tres conceptos: *ser*, *movimiento* y *conocimiento*. Habrá que renunciar al *Conocimiento absoluto*, al *Ser dado de una vez para siempre* y considerar al *Movimiento* y *con él al Proceso*, como un modo habitual del ser de las cosas. Es esta una base sobre la que resulta difícil construir algo consistente.

En suma, pocos pensadores han suscitado juicios tan controvertidos como Heráclito, casi siempre con escaso fundamento. Como tantos otros, se adelantó en gran medida a su tiempo, también fue olvidado o preterido, pero siempre quedó aguardando como rescoldo inquietante que alienta en toda innovación científica. Hemos de seguir con Heráclito a quien considero un *referente arcaico del viaje a la complejidad*, una de las primeras hogueras dispersas que alimenta el curso hacia nuestro paradigma. Se le considera afín, al menos geográficamente, a Mileto, donde se asentaron los primeros filósofos occidentales de que tenemos noticia –Tales, Anaximandro, Anaxímenes– aunque no se sabe cuáles fueron sus relaciones, si es que existieron. Parece ser que dejó un único texto constituido por sentencias y epigramas.

Ciencia en ciernes, Pensamiento que busca desplegarse. Heráclito no traza fronteras entre Ciencia, Sociología y Teología. El filósofo se detiene en especial en las relaciones entre los hombres, dejando a estas el cuidado del mundo en lugar de confiarlo a los dioses.

Aunque Aristóteles consideraba la «ambigüedad» como una de las debilidades de Heráclito, esa es precisamente su fuerza y su eterna novedad. Heráclito no maneja ni el absoluto de la *Idea platónica*, ni el rigor del *Logos aristotélico*. En el *logos* «... todo transcurre según la razón...». El *logos* (razón, discurso, historia) es norma universal conforme a la que *transcurren* todas las cosas.

La función, la estructura y el proceso frente a la estática esencia: *êthos anthrôpôi daimôn* (el carácter de un hombre es el guardián de su espíritu). Afirmación que la mayoría de los psicoanalistas sustentan y apoyan hoy.

Aristóteles sigue a Platón en el uso de la palabra *phrónesis*, el saber inmutable sobre el ser inmutable, en contraste a la opinión o la sensación, que son cambiantes como sus objetos. En *Ética a Nicómaco*, la *phrónesis* no es una ciencia (episteme) de lo necesario e invariable, sino la virtud *dianoética* – intelectual– propiamente humana cuyo cometido es lo contingente, lo que puede ser de otra manera. *Phrónesis* designa el *saber sobre lo contingente*, sin el cual, la libertad y la acción humanas serían imposibles.

Cambio frente a Ser; Proceso e Impulso *versus* Permanencia.

Para terminar, ¿es el fuego el antecedente de la energía? Afirmación presentida pero difícil de formular. La historia de la ciencia enseña que domeñar el fuego no fue solo producirlo a voluntad en las cavernas ancestrales, sino arrancarle uno a uno sus secretos, empresa que aún prosigue en nuestros días.

## INGLATERRA: EMERGENTISMO, PROCESO Y CAMBIO

Pasan los años. Las cuestiones de la ciencia se arropan y dignifican en perspectivas filosóficas.

¿Qué es lícito preguntar? ¿A qué llamamos *lo problemático*?

Innumerables son los vericuetos del proceso en relación con los hechos.

No es este lugar para profundizar sobre la filosofía del proceso. Baste decir aquí que a lo largo del tiempo el *conocimiento en la historia* será visto de manera dogmática –y por lo tanto inexacta– desde dos perspectivas bien dispares:

1.- Como función, transcurso, desarrollo y cambio; también como secuencia que encuentra su sentido en el mismo movimiento.

2.- Desde la atalaya del estar, de la esencia, los atributos, propiedades y deducciones que se desprenden de ellos, etc.

Ambas posiciones oscilan entre principios *vitalistas* y *naturalistas*. En los dos casos fue posible ahondar en el vértigo de lo procesual que aleja de lo dogmático como suprema expresión de lo establecido. Se está gestando la división *Naturwissenschaften* (Física, Química, Biología) y *Geisteswissenschaften* (Ciencias Políticas, Sociología, Antropología, Psicología, Economía, Lingüística, Historia y Ciencias del Arte).

En este caldo de cultivo discurre el *Emergentismo*.

Lo que ahora conocemos como Teoría de la Complejidad contempla al *emergente* como concepto clave (Ph. Ball 2004). *El todo es algo más que la suma de las partes*, esa es la premisa fundamental. Pero, es necesario realizar algunas acotaciones: el biólogo E. O. Wilson (1998) afirma que «por sí misma, la emergencia no es una explicación, a menos que tengamos algún conocimiento sobre la mecánica del sistema». Debido a ello, existen formulaciones sobre lo emergente en el *sentido fuerte* y otras llamadas *débiles*. Es importante tener en cuenta estas matizaciones toda vez que la historia de «lo emergente» mezcla estas dos perspectivas.

Digamos, para terminar esta digresión, que la «emergencia/descripción», la primera que surge en el tiempo, no satisface por entero las exigencias que la «emergencia/explicativa» pretende. Lo que anuncia el emergentismo filosófico queda en el terreno de lo descriptivo.

En 1920 surge la corriente de los emergentistas británicos, entre ellos Samuel Alexander (*Space, Time and Deity*, 1922), C. Lloyd Morgan (*Emergent Evolution*, 1923) y Ch. Broad (*The Mind and its Place in Nature*, 1925).

En esta última obra, Broad aborda el crucial problema de la *reducción*, no solo de algunas propiedades especialmente controvertidas (como la vida o la mente), sino del estatus mismo de las disciplinas científicas y sus relaciones.

La historia del concepto *emergencia* se enmarca en el debate sobre la posibilidad de la *reducción* de la psicología a la biología, de la biología a la química y de ésta, finalmente, a la ciencia más fundamental, la física, con el consi-

guiente conjunto de leyes específicas en cada uno de estos espacios del conocimiento. Broad defiende que solo existen dos opciones coherentes para el científico: el *mecanicismo* o el *emergentismo*. Para Broad, el mecanicismo concibe un único tipo de materia (o elemento constitutivo de la realidad) y una sola ley de composición de relación entre estos componentes y sus posibles combinaciones en niveles superiores. Esto permite una reducción-disolución progresiva de unas ciencias en otras más esenciales. En esta circunstancia, todas las ciencias son casos particulares de la física, ciencia última y universal, cuyas leyes definen la unidad de toda realidad.

El emergentista, admite la existencia de una sustancia física única, pero esta materia se organiza a través del proceso en sucesivos niveles, que provienen –emergen– unos de otros, caracterizados por propiedades específicas no reducibles a los niveles inferiores. Este autor dirá que una propiedad de una estructura *E* es emergente sí y solo sí *no puede ser deducida del conocimiento más completo posible de las propiedades de sus compuestos tomados aisladamente o integrados en otros sistemas diferentes a E*. Será preciso retener la esencial aportación del concepto emergente que sobrevive a las contingencias históricas del propio emergentismo. *Caos, Sistemas no-lineales y Complejidad emergen en una red sin jerarquía*.

#### FRANCIA: NUEVAS APORTACIONES AL PENSAMIENTO DE LA COMPLEJIDAD

Como conviene al naciente paradigma, surgen aquí y allá focos de pensamiento a los que sucederán estructuras más intrincadas. Será en Francia, Alemania y en el mundo anglosajón.

#### *Henri Poincaré (1854-1912). El caos en el horizonte*

Los comienzos del siglo XX alumbran a Poincaré. Su figura ocupa un lugar destacado en muchos lugares de esta obra. Baste por ahora señalar los impactos más esenciales. El *abuelo de la Teoría del Caos*, gracias al conocido problema de los *tres cuerpos* –conjetura de Poincaré– insidiosamente introduce la incertidumbre en las otrora tersas leyes de Kepler. Las leyes de Newton, fundamento de la mecánica clásica, solo resultan válidas para un sistema de dos cuerpos; más allá no predicen las trayectorias con exactitud. Dicho de otro modo: lo lineal deja paso a lo no-lineal. Tamaña hipótesis representa el ocaso de los ideales de estabilidad, del orden y de la predicción.

Si no hubiera sido por el efecto deletéreo de la religión, las variaciones cósmicas introducidas a partir del XVI no habrían significado nada especialmente revolucionario frente a las «estrellas fijas» de los griegos. Ciertamente Galileo, Copérnico y Kepler introducen sensibles cambios sobre las viejas concepciones, pero todas buscan y se ajustan al equilibrio, la armonía, a la posible predicción y, si se quiere, a lo eterno. El Universo inestable, histórico, impre-



decible, de carácter sublunar, es algo radicalmente nuevo y Poincaré provoca este giro que sustituye, consolida y hace progresar a la inversión copernicana.

### *La Escuela Normal Superior*

La *Escuela Normal Superior* supone un vivero sensibilizado hacia el estudio de la complejidad, por su amplitud curricular y la diversidad de sus intereses. Fueron *normaliens*: L. Pasteur, E. Galois, P. Langevin, R. Thom, R. Roland, J. Hypolite, L. Althusser, G. Canguilhem, J. P. Sartre, M. Merleau-Ponty, M. Foucault, J. Derrida, etc. Aquí nos ocuparemos solo de dos de ellos.

#### *M. Foucault (1926-1984). El diálogo interminable entre el Sujeto y su medio*

Lo propio del saber no es ni ver ni demostrar, sino interpretar. (M. Foucault)

Foucault produce una de las primeras contribuciones de la Escuela al episteme de la Complejidad. Reflexiona sobre el estatus de la epistemología hasta el punto de propiciar una *anti-epistemología*. Rehúsa pensar el sujeto, el objeto, y las relaciones entre ambos, dentro de moldes entonces vigentes, es decir: como *exterioridades* que colisionan haciendo mención exclusiva de lo *externo*, situadas por encima del sujeto del conocimiento. Esta postura, mucho más comprometida con el sujeto, implica no solo distancia ante cualquier positivismo científico, sino también un cuestionamiento radical al considerar al sujeto como categoría dada de una vez para siempre: «el sujeto no es ni una sustancia ni un todo, es una forma». Anuncia así la idea de *sistema complejo adaptativo*.

#### *René Thom (1923-2002). La bifurcaciones que conducen a las catástrofes*

Halte au hasard silence au bruit. (R. Thom)

Ne parlons donc jamais de hasard... (J. de Maistre)

Lo que se puede llamar la epistemología popular francesa nos ha gratificado estos últimos años con un cierto número de obras, algunas de las cuales han alcanzado gran celebridad. Citaré solo *El azar y la necesidad*, de Jacques Monod, *La Méthode*, de Edgar Morin, *Entre le cristal et la fumée*, de Henri Atlan, y *La Nouvelle Alliance*, de Ilya Prigogine e Isabel Stengers. Las filosofías subyacentes a estas diversas obras son diferentes, incluso opuestas. Pero, todas poseen un rasgo común, a saber: glorifican en exceso al azar, al ruido y a la fluctuación. Todas hacen a lo aleatorio responsable, bien sea de la organización del mundo vía las estructuras disipativas, bien sea de la emergencia de la vida y el pensamiento sobre la tierra, por medio de la síntesis de las mutaciones accidentales del ADN, según Monod. También Michel Serres no se queda atrás en *El Nacimiento de la física* al mostrarse apasionado partidario del *clinamen*<sup>1</sup> de Lucrecio... Esta fascinación por lo aleatorio demuestra una actitud por excelencia anticientífica. (R. Thom. *Halte au hasard, silence au bruit*. 1990).

---

<sup>1</sup> Epicuro y más tarde Lucrecio, negaron con el *clinamen* el determinismo del universo otorgándole libertad.

Así se expresa René Thom para deslindar su Teoría de las Catástrofes, la primera en ver la luz de manera decidida en el entorno de la complejidad, de otras teorías que considera menos rigurosas.

Existen diversas categorías de *crisis*, un concepto que anticipa la noción de *catástrofe* de R. Thom, de capital importancia para la matemática de la complejidad. Las catástrofes son bifurcaciones posibles entre diferentes equilibrios caracterizados por *atractores de punto fijo* que los rigen. Se clasifican en relación al número de parámetros que varían de forma simultánea. Son simples o más complejas. Por ejemplo, si son dos parámetros los que se transforman, el tipo resultante se llama *catástrofe punto*; esta teoría no contempla una alteración de más de cinco parámetros. En los años setenta René Thom quiso anunciar que la comprensión de los cambios, sobre todo en los sistemas sociales, podía provenir de pequeñas variaciones iniciales.

*La teoría de Thom es fenomenológica y cualitativa, no ofrece explicaciones fundamentales y la adecuada identificación de los mecanismos que intervienen en los procesos que describe.*

Por el contrario, la Teoría del Caos, que aparece unos diez años después, revela algo más consistente y proporciona mayor información sobre el por qué de la imposibilidad de predecir la evolución de los sistemas dinámicos.

Lo esencial en la Teoría de las Catástrofes se resume así: *una acción continua produce resultados discontinuos*. Dicho de otro modo: la Teoría de las Catástrofes es *una expresión matemática de los cambios estructurales*.

Los puntos interiores de un conjunto continuo son *puntos regulares* y los puntos que integran su frontera *puntos catastróficos*. Los primeros están rodeados de otros con la misma apariencia, forman el *espacio de la continuidad*. En los puntos de la frontera o catastróficos se pasa de la continuidad al cambio súbito. *Esta distinción entre puntos regulares y catastróficos es preliminar no solo para la Teoría de las Catástrofes, sino para toda disciplina que establezca descripciones sobre cualquier forma teórica*. René Thom demostró que para los sistemas con una o dos variables y en los que influyen hasta cuatro parámetros (tiempo, temperatura, gradientes, etc.), hay *siete rupturas o catástrofes elementales (morfologías o formas)*, a las que se han dado nombres muy evocadores: *pliegues, cúspides, colas de milano, mariposas y ombigos, elíptico, hiperbólico y parabólico*.

La Teoría de las Catástrofes pretende describir las discontinuidades que pudieran acontecer en la evolución del sistema. Intuitivamente, la evolución global se presenta como una sucesión de evoluciones continuas, separadas por saltos bruscos de naturaleza cualitativamente diferente. Para cualquier evolución continua subsiste el marco del tipo diferencial clásico, pero los saltos hacen que se pase de un sistema diferencial a otro. Desde una evolución continua, descrita por un sistema de ecuaciones diferenciales a otra evolución igualmente continua descrita por otro sistema. No se puede excluir que un número finito de sistemas resulte suficiente para describir la situación por completo. (R. Thom, 1990).

A pesar del fracaso —según los cánones del positivismo— de la Teoría de las Catástrofes como teoría científica aplicada, Thom ha abierto las matemáticas a las formas o morfologías del mundo, con el fin de comprenderlo, de encontrar su sentido, no solo movido por el afán de predecir sucesos, clásico ejercicio decimonónico de la ciencia. Las formas o morfologías del mundo son captables por medio de las matemáticas. Este diálogo dará, con el tiempo, sus frutos.

*E. Morin (1921-). El método que se abre paso en el desorden*

Un orden surge de la Decadencia y el Desorden  
He Xiu (129-182), en los tiempos de la dinastía Han.

Qu'on ne nous parle plus des Lois de la Nature. (Léon Brillouin)

Quizás con Morin se evidencia de manera clara el diferente peso ideológico que para Europa y Estados Unidos posee el naciente paradigma de lo complejo. Con los segundos, siempre en términos groseramente generales, significó ante todo una fascinante *aventura del conocimiento*. Pero, al mismo tiempo, *el conocimiento mismo y su entorno eran de interés secundario*. Durante 1962-63, en *Por una política del hombre* (México, 1971), Edgard Morin se adentró en lo que M. Grinberg (2003) llama «una síntesis *antropolítica*, donde se permitía dudar del carácter revolucionario (en sentido marxista) de las revoluciones de corte socialista»<sup>2</sup>. De igual manera describía las insuficiencias del dogmatismo freudiano y destacaba el descomunal brote de barbarie constituido por dos megaguerras en el corazón de la civilización occidental, con el nazismo, el fascismo y el estalinismo, que obligaban a sumergirse sin piedad en la cabeza y el corazón del hombre. Fue inequívoco: sostuvo que *a Freud le falta el homo-faber y a Marx la psique* (con su cosmogonía de locura, poesía y misterio)<sup>3</sup>. Advertía que en un planeta entregado a una revolución desenfrenada, se abrían rumbos que oscilaban entre la desintegración, una nueva génesis o una metamorfosis. *Introduction à une politique de l'homme*, (París: Seuil, 1965).

La explosiva insurrección estudiantil de Mayo de 1968 en Francia, acompañada por un alzamiento internacional de la juventud, no solo en Europa (España, Alemania, Italia), sino también en Estados Unidos (California), América Latina (Cuba, Argentina, Uruguay) y Asia, (Camboya, Vietnam), llevó a Morin a incluir un epílogo en este texto que declaraba la necesidad de configurar *islo-*

<sup>2</sup> *E. Morin y el Pensamiento Complejo*. B. Aires: Campo de Ideas 2003., M. Grinberg.

<sup>3</sup> Un año después, 1969, Berthold Rothchild (Suiza); Hernan Kesselman, Armando Bauleo y Antonio Caparrós (Argentina); Nicolás Caparrós (España); M. Claire Booms (Francia); Giovanni Jarvis y Pier Francesco Galli (Italia) y otros, nos hicimos eco de esa insuficiencia desde el costado psicoanalítico que, por aquel entonces, imperaba en la Asociación Psicoanalítica Internacional, con su olvido del entorno, otorgando exclusividad al espacio intrapsíquico. Fundamos en Roma *Plataforma Internacional*, que duró veinte años, hasta que decidimos disolverla en 1989, el día de la caída del muro de Berlín; juzgamos entonces que su misión contestataria y alertadora de conciencias había sido cumplida.

*tes de investigación* donde habría que esforzarse por construir una teoría *antropo-cosmológica* sin la cual no existiría concepción revolucionaria posible.

Una de las salidas ofrecidas en aquellos años fue el llamado *freudomarxismo*. Difícil compromiso sin establecer mediaciones que rara vez se hicieron. Precisamente la Teoría de la Complejidad ayuda a entender y a confrontar estas dos prietas corrientes de ideas. Freud actúa en el nivel de integración Psicológico, Marx en el social. En sus respectivos planos, ambas teorías son igualmente subversivas, pero la primera adopta como unidad mínima al *sujeto*, mientras que la segunda lo hace con ese gran grupo, condicionado económicamente en última instancia, que llamó *clase*.

No podemos *reducir* el marxismo al psicoanálisis, poseen leyes diferentes.

Morin define en esa tesitura al *homo complexus*: somos criaturas sensibles, neuróticas y delirantes, al mismo tiempo que racionales y todo ello constituye el tejido propiamente humano. Pensamiento y Emoción, esa difícil dupla articulable en el seno de sus innegables contradicciones. Dirá M. Grinberg:

Este ser humano es a la vez un ser racional e irracional, capaz de mesura y desmesura. Como sujeto de un afecto intenso e inestable, sonrío, río, llora, pero también sabe conocer objetivamente. Invasado por lo imaginario e igualmente reconocido de lo real, sabe que existe la muerte pero que no puede creer en ella. Segrega el mito y la magia, pero también la ciencia y la filosofía. Está poseído por los Dioses y por las Ideas, pero duda de los Dioses y critica las Ideas. Lo nutren conocimientos comprobados, pero también las ilusiones y las quimeras.

Edgard Morin sentencia:

Y cuando en la ruptura de los controles racionales, culturales, materiales, existe confusión entre lo objetivo y lo subjetivo, entre lo real y lo imaginario, cuando hay hegemonía de ilusiones, desmesura desencadenada, entonces el «homo demens» somete al «homo sapiens» y subordina la inteligencia racional al servicio de sus monstruos... Pero, ¿quiénes somos nosotros, hombres sapientes-dementes? Somos la extremidad de un ala cósmica, impulsados en y por una aventura que nos desborda. Poseídos por los mitos, los dioses, las ideas, somos casi sonámbulos. Nuestro pensamiento adquiere vida a la temperatura de su propia destrucción. En nosotros está todo el secreto del mundo, pero lo ignoramos y nos es incomprensible: tal vez sea el misterio del misterio.

Morin posee por aquel entonces el regusto y el ímpetu del Mayo del 68 (del que Francia será un emergente), cuya virtud consistió en poner palabras a las oleadas político-sociales, gnoseológicas y emocionales que balbuceaban, indecisas, por toda Europa. En realidad, fueron sus vanguardias intelectuales las que *supieron* y con su pensamiento proyectaron un futuro, el movimiento estudiantil quedó en proclamas tales como *Chars Lourds, Salaires légères*. O en ese «Prohibido Prohibir» que afrontó el vacío vertiginoso del miedo a la libertad sin proyecto alternativo de lo que la España de aquella época entendió tanto. ¿Qué decir del movimiento del campus californiano? También se agotó en una libertad sin horizontes y sin causa: *Give peace a chance*, dijeron y la emotiva y ahora nostálgica cantinela se agotó en sí misma.

Del orden establecido al desorden en las lindes de lo azaroso. En un mundo atravesado por los paroxismos deformantes del pensamiento único y excluyente, el incipiente pensamiento complejo se yergue frente al universo dividido de la física, la biología, la sociología, la antropología, la filosofía y la política. Paradoja que, por lo cotidiana, apenas se advierte.

Para Morin, el *pensamiento complejo* significa establecer relaciones. *Complexus* es aquello que está tejido. Por consiguiente, se opone al aislamiento de los objetos de conocimiento, los restituye a su contexto y reinserta en la globalidad a la cual pertenecen.

Diríamos que el bucle *sapiens* ↔ *demens* denuncia la visión unilateral que define al ser humano como (*homo sapiens*), como actor de la técnica (*homo faber*), o quizá dedicado a actividades utilitarias (*homo economicus*). Lejos de ser un mosaico, el ser humano es complejo; en el sentir de M. Grinberg (2003):

Racional y delirante (*sapiens* y *demens*) trabajador y lúdico (*faber* y *ludens*) empírico e imaginador (*empiricus* e *imaginarius*) económico y dilapidador (*economicus* y *consumans*) prosaico y poético (*prosaicus* y *poeticus*).

El hombre yace en lo *real inalcanzable*, busca la *realidad inabarcable*, discurre en lo *imaginario vertiginoso* piensa y actúa en el espacio que el *entorno innumerable* ofrece.

Las interacciones y las retroacciones son múltiples y acaso interminables.

En la relación entre orden, desorden y organización se cifra el nudo gordiano de la complejidad. Para establecerla, Morin recurre al *bucle* en lugar de a la *relación diádica* de carácter dialéctico. Un bucle es una sentencia que se realiza repetidas veces hasta que la condición asignada a dicho bucle deje de cumplirse.

Complejo es lo entretejido:

La innovación presupone o provoca una cierta desorganización o relajamiento de las tensiones, estrechamente vinculadas con la acción de un principio reorganizador, en el seno del sistema vivo en que aparece. La característica primordial de la hiper-complejidad es, precisamente, actuar como moderadora de las coacciones en un sistema que, de hecho, se encuentra en un cierto estado de desorden permanente a través del juego de las libres asociaciones aleatorias. (Grinberg, 2003).

Como Morin (1977) señala, en una afortunada síntesis en esta senda:

En el origen de las ideas que he desarrollado encontré primero a H. Atlan, que me despertó de mi sueño empírico iniciándome a la noción de *desorden creador*, después a sus variantes: *azar organizador*, *desorganización – organización*. Atlan me introdujo a von Foerster, nuestro Sócrates electrónico, a quien debo muchas de mis ideas fundamentales; von Foerster me hizo descubrir a Gunther, Maturana y Varela. Cada uno a su manera, me permitieron, al fin, contemplar lo invisible, la noción *auto* y de reintroducir el concepto de *sujeto*. (*La Méthode*, 2008, p. 52).

El tejido inconsútil de autores lleva al antes y al después en ese presente extenso que personifica al pensamiento, al proceso de pensar.

### H. Atlan (1931- ) o la Auto-organización

Parce qu'ils se sont conduits avec moi au hasard, moi aussi je me  
conduirai avec eux au hasard. *Levítico XXVI, 40, 41*

He hervido en mi marmita todo lo que es azar. Solo cuando el azar está cocido  
en su punto le doy la bienvenida para que me sirva de alimento.

*Así hablaba Zaratustra (F. Nietzsche)*

Seguimos en similares torbellinos del conocimiento.

Nacido en Blida, Argelia, estudió medicina en París y se doctoró en 1958. Su trabajo como investigador se centra en las teorías sobre la *autoorganización* de los seres vivos en el escenario de la complejidad. Interés que discurre entre la biología y la filosofía; por ello atiende al estudio de las relaciones ciencia, ética, bioética, inteligencia artificial, ingeniería genética y también la teoría de la información, como aborda en una de sus primeras obras: *L'organisation biologique et la théorie de l'information* (Paris: Hermann, 1972). En este texto busca construir el orden a partir del «ruido», un trabajo que combina cibernética, biología y teoría matemática de la información.

Los *sistemas auto-organizados* no solo resisten al ruido -agresiones del entorno- sino que albergan capacidad de respuesta, producen mecanismos de aprendizaje que mantienen y regeneran su equilibrio vital.

En los años sesenta, formará el grupo de los diez en el que figuran Jacques Robin, Henri Laborit, el ya citado E. Morin, René Passet, Joël de Rosnay, etc.

Su formación pluridimensional y la capacidad de diálogo con otros científicos animados por el aguijón de lo complejo le llevan a estar entre los pioneros de este episteme en el continente europeo. Escribe Atlan:

En los artefactos construidos por el hombre este persigue, mediante su concurso, objetivos. Las estructuras y funciones que encierran vienen definidas en relación a estos fines. Su significado es *previo* a su existencia y procede de quien lo construye. En los sistemas naturales, la propia noción *auto-organización implica un origen interno*, tanto para las estructuras como para los significados funcionales que producen aquellas. En Kant (1724-1804) los organismos vivos quedan definidos por su «capacidad de finalidad interna»; en el contexto vitalista del siglo XVIII esta propiedad pertenecía a una inteligencia superior, con posibilidades de orientar los fenómenos vitales de manera teleológica.

El salto a la *hipótesis de la divinidad* era una obligación ancestral, tentación que antes tampoco pudieron superar Newton (1642-1727) o Leibniz (1646-1716). Metafísica teológica que dispensa al hombre de inquirir como tal acerca de los orígenes del conocimiento. Las teorías modernas de la auto-organización procuran, por el contrario, asignar a esta unos orígenes mecánicos sujetos a leyes físico-químicas.

Atlan distingue a este propósito dos tipos de *auto-organización*:

a) *En sentido débil*. Este apartado incluye desde las aplicaciones del cálculo a partir de las redes neuronales a las técnicas de inteligencia artificial. El cálculo se efectúa con artefactos dispuestos en paralelo. Cuando la tarea se define

por *adelantado*, las instrucciones provienen del *exterior*. El objetivo de este aprendizaje es reconocer una *forma*. La significación del funcionamiento de la red se define desde el ser que la concibe sobre la base del criterio de *eficacia*. El *re-conocimiento* no es *conocimiento*; así, es ajeno a la creación.

b) *En sentido fuerte*. Aparecen ahora los sistemas *auto-organizados intencionales y no intencionales*; estos últimos alcanzan pleno desarrollo en la especie humana. Son unidades interconectadas en red; de manera simplificada simulan la actividad eléctrica de las neuronas, adquieren capacidad de aprendizaje no programado y poseen memoria de asociación–almacenamiento y recuperación de información por asociación con otros datos. *Estas redes se dicen auto-organizadas o emergentes ya que su funcionamiento opera por medio de modificaciones en las conexiones no programadas de manera explícita*.

La auto-organización de la estructura concreta de las conexiones no está programada específicamente. La auto-organización en el sentido fuerte supone que la tarea a realizar, la que define el significado de su estructura, constituye una propiedad emergente de la propia máquina. Es lo que sucede en los sistemas naturales no programados, donde se observa la emergencia de estructuras y de funciones a un nivel macroscópico a partir de limitaciones específicas de índole físico-química del ámbito microscópico.

Lo emergente nace *a posteriori* como un comportamiento dotado de sentido.

### *El papel de la interpretación*

Viene ahora otra reflexión de capital importancia; para describir estas propiedades emergentes, a la vez estructurales y funcionales, hay que tener en cuenta la existencia del punto de vista del observador –no con la connotación de una pretendida *subjetividad* sino, como es el uso de la física, con el sentido de *condiciones objetivas de observación y medida*. Considerar a una red como algo que ha adquirido (por auto-organización) la significación de una máquina que reconoce formas, es una *interpretación* efectuada por el observador. Constituye una proyección de las propias experiencias cognitivas de reconocimiento de formas, sea directamente o por medio de máquinas concebidas al efecto.

Desde ese punto de vista, los sistemas humanos –individuales y sociales- están a medio camino entre los *sistemas naturales*, donde el origen de los significados es interno, solo observable desde el exterior mediante una proyección interpretativa y las *máquinas artificiales*, cuya finalidad, es decir el origen de su significado, es conocida en la medida en que está planificada por los humanos. Los *sistemas humanos* son al tiempo *máquinas, autores y observadores de dichas máquinas*. Estos sistemas ocupan un lugar específico y desde su condición de observadores-observados, tomarán en consideración la cuestión de la *intencionalidad*. Ello no presupone aceptar la realidad del libre albedrío y no plantear la existencia de determinaciones causales para las intenciones mismas. Solo la intencionalidad creadora del proyecto es reconocida como una especie de causa eficiente particular y como tal, objeto específico de las ciencias del

hombre. La cuestión del libre albedrío puede quedar de lado hasta conocer en detalle cómo se determinan de forma causal las intenciones específicas.

### *Transformación de una secuencia causal en procedimiento*

Se puede ir más lejos en la búsqueda de mecanismos físicos de la *intencionalidad*. A partir de los modelos de auto-organización en sentido fuerte, nada impide concebir que la capacidad de realizar proyectos y poseer comportamientos intencionales determinados por aquellos, puedan estar integrados y modelados como resultado de un mecanismo de auto-organización –en el sentido humano, intencional–, en el funcionamiento de las redes neuronales. Esta concepción concuerda con la observación de determinados tipos de comportamientos, aparentemente intencionales –aunque sean limitados– producidos por redes neuronales diferentes a las nuestras, como cerebros de otros seres que nos son próximos. Se sabe, por ejemplo, que ciertos monos que en su momento alumbraron determinados gestos desprovistos de significado funcional, descubren sus efectos y reproducen entonces la secuencia de manera teleológica con el propósito de recrearlos. Eso pudo ocurrir también en la fabricación de las herramientas primitivas. Acaso una estructura temporal, bajo la forma de sucesión de estados de una red emergente en una dinámica puramente causal de interacciones entre sus elementos, adquiera una significación funcional a los ojos de un observador exterior.

Se obtiene un grado más sofisticado mediante la memorización de los procedimientos, lo que permite adquirir un modelo de experiencia de fabricación de proyectos independiente de los procedimientos singulares, que son los que deparan la conciencia de intencionalidad.

Conclusión: en todos estos casos, el proyecto sobre *lo futuro sería el resultado de la conversión del efecto en causa, como escenario de la representación*. Es decir, lo que es la finalidad de un procedimiento y su consecuencia en una acción que precede a su representación, se torna en causa en el seno de aquella. Cuando una secuencia temporal se memoriza, el *orden pasado-futuro* deviene *orden simbólico*, el tiempo se desvanece, ya que la secuencia en su totalidad está presente en la memoria.

Pero, además, el estado final de un proceso no se limita a su memorización, sino que implica una *función de satisfacción, algo más que una simple función de optimización definida e impuesta desde el exterior*. La función de satisfacción adopta la forma de una distribución de frecuencias de estímulos diferentes, acontecidos a lo largo de la historia entre aquellos que la estructura emergente del sistema permite reconocer. Ver Atlan (1986, 1987).

### *Conciencia-Memoria y Auto-organización inconsciente*

La conciencia de que tratamos en este apartado no se refiere a la conciencia de la fenomenología orientada hacia un futuro; es ante todo una memoria de estadios y procesos pretéritos. La intencionalidad creadora, la que proporciona



significados, conviene a los fenómenos auto-organizativos –en su origen inconscientes–, producidos por la emergencia de estructuras y funciones nuevas. De forma secundaria, estas estructuras y funciones aparecen como tales en una actividad consciente derivada de aquella; la conciencia-memoria observa la emergencia y la memoriza.

A partir de este modo de interacción, entre consciencia-memoria y auto-organización inconsciente, surge la reflexión que pretende entrever la forma en que una conciencia intencional o una intención consciente nazca no ya como un fenómeno primario, fundador, sino como algo derivado.

#### LAS APORTACIONES ANGLOSAJONAS

A diferencia de Francia, sus muchos focos proceden de la física y las matemáticas; su desarrollo estableció puntos aislados que se constituyeron en verdaderos atractores de la Teoría de la Complejidad en su más amplia acepción. La epistemología se construye en un *a posteriori* y no como exigencia previa.

#### *Edward Lorenz (1917-2008) y el inquietante vuelo de una mariposa*

Desde la tradición clásica *determinismo llevaba a predicción*. Pero los sistemas complejos deparan la sorpresa de que se fundan en fenómenos de baja dimensión, de carácter determinista, que reciben el nombre de *Caos*. *Determinismo ya no implica predicción*.

Lorenz es uno de los pioneros de la Teoría del Caos. En 1971, tras asistir a un congreso sobre la turbulencia –esa turbulencia que ya fascinó hace siglos a Leonardo da Vinci–, en el que escuchó a D. Ruelle<sup>4</sup> oyó entonces por primera vez hablar del concepto «atractor extraño». Naturalmente la *meteorología* tenía que ver con lo turbulento. Estas ideas le impulsaron a simplificar su modelo, inicialmente más rebuscado y advirtió que su sistema, totalmente determinista, era *aperiódico e impredecible*: la carta de naturaleza de la Teoría del Caos.

En Lorenz opera el discurso del verdadero científico, capaz de sorprenderse y abandonar teorías consagradas que la realidad rebate con obstinación. Como tantos otros, perseguía la *predicción* en algo tan evanescente como la meteorología. Su comienzo fue casi laplaciano: si pudiéramos establecer suficientes grupos de observación sería factible predecir el tiempo. Sucedió en 1961, en los comienzos de la era de la computación. Las computadoras permitieron abordar problemas que antes, por su ingente y tedioso proceso de resolución, eran imposibles de resolver.

Abordaremos con más extensión el trabajo de Lorenz en otro lugar, baste ahora decir que su hallazgo capital consistió en descubrir que en la computación de su modelo, las condiciones iniciales eran muy sensibles a la hora de establecer los resultados y que, dado que estas eran imposibles de ser fijadas de

---

<sup>4</sup> Ruelle, D., Takens, F. «On the nature of turbulence», *Commun Math. Phys.* 20, 167, 1971

manera exacta, resultaba inverosímil formular con absoluta precisión las consecuencias. Lorenz descubrió el ahora famoso *efecto mariposa*, es decir, *el desarrollo sensible a las condiciones iniciales*.

Lorenz y Ruelle, dos autores que anuncian un futuro paradigma.

## LA AUTO-ORGANIZACIÓN Y LAS ESTRUCTURAS DISIPATIVAS

*Nature and Nature's Laws lay hid in night;  
God said, let Newton be! And all was light*<sup>5</sup>. (A. Pope)

En 1977 Ilya Prigogine mostró que las llamadas *estructuras disipativas* son sistemas coherentes auto-organizados lejos del equilibrio. Estas estructuras solo pueden existir en conjunción con su entorno.

El término *estructura disipativa* busca representar la articulación de las ideas de orden y disipación. El nuevo hecho fundamental consiste en que *la disipación de energía y de materia, que suele asociarse a la noción de pérdida y evolución hacia el desorden se convierte, lejos del equilibrio, en fuente de orden*. Algo que parece caótico a nivel macroscópico posee orden en dimensión microscópica. Los fenómenos de auto-organización y la dinámica de los sistemas inestables asociados a la idea del caos, están caracterizados por un tiempo unidireccional. En el dominio de lo psíquico surgen por doquier brechas en el otrora seguro edificio del determinismo. ¿Cómo entender la creatividad o la misma ética en el seno de lo inexorable? Para la ciencia moderna, como bien afirma I. Prigogine (1996), existe «una nueva racionalidad que no identifica ciencia y certidumbre, probabilidad e ignorancia».

Los sistemas de complejidad creciente disfrutan de mayores grados de libertad y con ella la certidumbre se desvanece como valor absoluto. Solo la angustia permite añorar el paraíso perdido donde todo era previsible, donde el pensamiento mágico proporcionaba un control que la realidad no permite. La biología presenta ya numerosos ejemplos de indeterminación, pero ésta alcanza su apoteosis con el psiquismo que anuncia el definitivo ocaso de las causalidades.

### *James Yorke y el Caos*

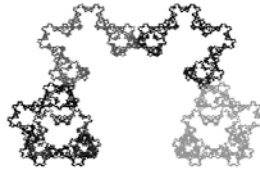
Llega el salto a la popularidad. Años después, en 1975, el matemático J. Yorke bautizó a toda una serie de hallazgos, de índole dispersa que ponían en cuestión la capacidad de predecir, con el término *Caos*. La matemática y el conocimiento subsiguiente de los sistemas no-lineales, permitió una visión de conjunto para las numerosas llamadas de atención sobre la incertidumbre. En su aparición en los medios científicos prefirió de manera más cauta denominarlo «Period Three implies Chaos», para comunicar a los medios científicos la idea de desorden (Glick, 1987). Al fondo queda la conjetura de Poincaré, que compartía con Yorke su condición de matemático.

---

<sup>5</sup> La naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche: Dios dijo: ¡Hágase a Newton! Y se hizo la luz. *Proyecto de epitafio para I. Newton*.

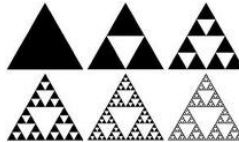
## FRACTALES

Si bien el vocablo fractal, que se debe a Benoît Mandelbrot, es muy reciente, la noción es anterior. En las postrimerías del siglo XIX se conocía como *curvas no derivables* (que no admiten tangente en ninguno de sus puntos). Los antecedentes del concepto se remontan a nombres tan ilustres como G. Cantor (1845-1918); con el llamado *polvo de Cantor* (conjunto infinito y no numerable de puntos disjuntos; su dimensión topológica es cero), G. Peano (1858-1932) y la curva que lleva su nombre (un objeto –una curva- de dimensión topológica 1 que se pliega sobre sí misma de forma que ocupa totalmente el plano alcanzando la dimensión 2) cuyo estudio profundizó más tarde David Hilbert (1862-1943). Helge von Koch describe en 1908 una curva no diferenciable en punto alguno, es decir una curva no derivable:



Curva de Koch

En la misma línea consignemos el triángulo de Waclav Sierpinski (1882-1969), que data de 1916, objeto con superficie nula.



Lo esencial de un objeto fractal es la *auto-similaridad*. A cualquier escala la *parte es semejante al todo*.

*Ecuaciones Recursivas, Geometría Fractal y Formas preferidas por la naturaleza*

En algunas ecuaciones recursivas, aquellas donde su resultado alimenta a la siguiente ecuación, se encuentran formas que se aproximan a las *fronteras del caos*. En unos niveles específicos y regulares, la gráfica se bifurca. Ocurre tanto en la matemática como en sistemas naturales.

Mitchel Feigenbaum utilizó en su famosa investigación una computadora muy simple y una ecuación recursiva cuya representación gráfica es una parábola. Tras un laborioso trabajo descubrió *una constante de la naturaleza que permite entender las ramificaciones periódicas o bifurcaciones de cualquier sistema no-lineal en regiones próximas al caos*. Estas transiciones aparecen de modo *súbito* cuando los materiales sufren fuertes perturbaciones o atraviesan *cambios de estado*. El desdoblamiento caótico es lo que impide *predecir* el

curso de un sistema tras varios episodios de este tipo. Aunque la ecuación sea en sí muy simple, el resultado final es de enorme complejidad. Lo característico de estas imágenes (que provienen de múltiples iteraciones de la ecuación recursiva representada gráficamente con números complejos), es la aparición de la proporción (*scaling*). La forma fundamental se duplica con variaciones a cualquier escala de ampliación.

DIAGRAMA DE FEIGENBAUM

Se puede demostrar de una manera simple la Teoría del Caos en referencia al diagrama de Feigenbaum:

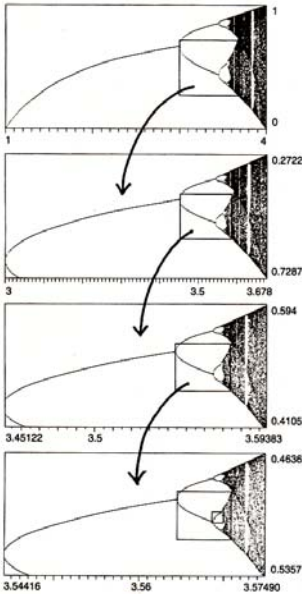


Diagrama de Feigenbaum

El mencionado diagrama representa la expresión gráfica de una ecuación llamada *iterador cuadrático*. Los valores de «x» se computan utilizando la fórmula que veremos a continuación. Cada valor se obtiene mediante la sustracción del valor previo de «x» del número 1 y multiplicando el resultado por «a» (y también por el valor previo de «x»). En la secuencia el cálculo de «x» comienza con  $x=c$ , realizándose un número de iteraciones extremadamente grande. En el gráfico estos valores se colocan en el eje vertical; en el horizontal se insertan los valores de la variable «a», que discurren de izquierda a derecha a lo largo del eje horizontal. Al hacerlo aparece un esquema que no podríamos haber anticipado antes de que los cálculos con ordenador lo hicieran posible.

La ecuación es como sigue:

$$x_{n+1}=ax_n(1-x_n)$$

donde  $n=0, 1, 2, \dots$

En el diagrama, los valores del lado izquierdo de la ecuación aparecen en el eje «y», mientras las abscisas denotan el tiempo (el número de iteraciones).

Para valores de «a» menores de 2 el valor  $x_{n+1}$  se incrementa lentamente.

Para valores de «a» entre 2 y 3 el valor  $x_{n+1}$  oscila atrás y adelante entre dos valores relativamente fijos.

Si «a» es mayor de 3, especialmente si se aproxima a 3, 5699456... entonces  $x_{n+1}$  empieza fluctuar entre dos valores; luego entre 4 y así sucesivamente en una cascada de *duplicaciones rápidas* (llamadas también *bifurcaciones*).

Esta duplicación rápida del valor  $x_{n+1}$  es, por definición, el origen del caos matemático. El inicio del caos siempre ocurre en un punto a lo largo del eje-x, el 3,5699456... conocido ahora como *punto de Feigenbaum*. Además, cada

intervalo de duplicación, dividido por el siguiente, es también una constante, 4,669206..., es el número  $\Sigma$  de Feigenbaum.

La duplicación rápida (inicio del caos) sucede 4,669206 veces más rápida con cada suceso duplicador, es eso lo que produce la sensación de cascada.

Cada uno de esos números son *constantes de la naturaleza*; ello significa que la gráfica que se presenta en el caos de los fenómenos naturales como, por ejemplo, la frecuencia de descarga de una neurona, obedece a esos números.

Si aumentamos cualquier parte del esquema caótico del diagrama, este reproduce el esquema original, lo que significa que posee la característica fractal de *sibisemejanza* que acompaña a los sistemas no-lineales.

La ecuación recursiva más famosa

$$z \rightarrow z^2 + c$$

fue utilizada por Benoît Mandelbrot en el *conjunto de Gaston Julia*. La geometría fractal posee dimensiones fraccionarias. I. Stewart (1990) escribe:

La distinción geométrica entre formas netas como círculos y esferas y otras más ásperas, tales como los fractales, es precisamente la diferencia que existe entre los atractores familiares de la matemática clásica y los atractores extraños del caos. Ahora se acostumbra a definir un atractor extraño como fractal... De manera que los fractales aparecen hoy en la ciencia de dos formas diferentes: como herramienta descriptiva para estudiar procesos y formas irregulares o como deducción matemática de una dinámica subyacente de tipo caótico, (pp. 221-222).

#### APROXIMACIÓN HISTÓRICA A LOS SISTEMAS NO LINEALES

Ese proceso ha popularizado conceptos y términos tales como Caos, Fractales o Atractores extraños, tanto en el dominio de la Física como en otras muchas ciencias. No obstante, resulta sorprendente que tan solo hace unas décadas muy pocos físicos habían oído hablar de estos temas.

Desde el punto de vista de la tradición de la Física, deberíamos remontarnos a la época de Isaac Newton (1642-1727) y al nacimiento de la Mecánica Clásica. A través de la enseñanza de dicha disciplina se ha transmitido a generaciones de físicos la noción de la *teoría causal y determinista* que asociamos al nombre del matemático francés Pierre Simon Laplace (1749-1827), según la cual, conocidas de forma exacta las condiciones iniciales de un sistema físico dado, es posible predecir con absoluta certeza el estado del sistema en cualquier otro instante de tiempo sin más que hacer uso de las ecuaciones de Newton. Frecuentemente se ha asociado determinismo a conocimiento e indeterminación a ignorancia y no a una propiedad intrínseca del problema que abordamos.

M. Fernández Sanjuán escribe:

La idea básica que subyace a nuestra incapacidad para predecir el resultado del lanzamiento de una moneda o de un dado está ligada, precisamente, a la noción de la dependencia sensible a las condiciones iniciales, de modo que no resulta posible predecir su evolución a largo plazo, porque en la práctica no podemos fijar con absoluta precisión sus condiciones iniciales. Así, estados iniciales muy cercanos, indistinguibles dentro de la limitada precisión de nuestras medidas, llevan a trayecto-

rias que se separan exponencialmente en el tiempo, lo que implica incertidumbre sobre el desarrollo posterior del movimiento. Es precisamente este tipo de movimiento el que recibe el nombre de *caótico*. Dentro de la tradición de la Física, la idea de que existe una incertidumbre irreductible nos ha sido transmitida como algo ligado a la Mecánica Cuántica, en particular, a la interpretación probabilística de la función de onda y al principio de incertidumbre de Heisenberg, dando siempre por sentado el carácter completamente determinista de la Mecánica Clásica. No es, por tanto, extraño el hecho de que algunos de los creadores de la Mecánica Cuántica se hayan preocupado por el papel del azar en el campo de la Mecánica Clásica. De hecho, el efecto de la dependencia sensible a las condiciones iniciales fue puesto de manifiesto por el físico alemán Max Born (1882-1970) en un artículo muy poco conocido titulado *Is Classical Mechanics in fact deterministic?*, escrito en 1955. El modelo que Born tenía en mente es el conocido gas bidimensional propuesto por el físico holandés H. A. Lorentz (1853-1928) en 1905 como modelo para la conductividad de los metales y que se usa incluso hoy día como uno de los modelos fundamentales de la Mecánica Estadística del no Equilibrio. Hablamos de un sistema dinámico en el que una partícula se mueve entre un conjunto de obstáculos fijos con los que choca. En este sistema es claro que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales llevan a estados ulteriores completamente diferentes. Born concluyó que en realidad el determinismo de la Mecánica Clásica resulta ser una falsa apariencia, debido a que no es posible determinar con absoluta precisión las condiciones iniciales de un sistema físico dado. Similares reflexiones fueron realizadas en la misma época por el célebre austriaco Premio Nobel de Física E. Schrödinger (1887-1961).

Y también:

Para una gran mayoría de físicos el tiempo es una ilusión, como sentenció Einstein. En la descripción fundamental de la naturaleza no existe flecha del tiempo. Los físicos atribuyen al mundo una simetría temporal. Sin embargo, en la cosmología, en la química, en la biología o en las ciencias humanas, pasado y futuro son asimétricos, representan funciones diferentes. Es esta la paradoja del tiempo, la versión filosófica del dilema del determinismo. (Caparrós, 1994).

## EL INSTITUTO SANTA FE

Las teorías necesitan historias y esencias. (Stephen Jay Gould)

El descubrimiento de la Teoría del Caos se apoya en la comprensión de los sistemas dinámicos no lineales.

En el decir de Ch. Langton, el Caos es un subconjunto de la Complejidad en la medida en que se ocupa de sistemas dinámicos no-lineales.

Este grupo, básico para el desarrollo más genuino del Paradigma de la Complejidad, se creó en 1984; estaba formado por físicos, matemáticos, biólogos, psicólogos, arqueólogos y sociólogos, entre ellos M. Gell-Mann, S. Kauffman, P. Bak, Ch. Langton, S. J. Gould, J. Holland y M. Mitchell. La misma composición del grupo armonizaba con los objetivos en un reto esencial a lo *trans-disciplinario*, como actitud superadora de lo *inter-disciplinario*. *Red de ciencias* sin jerarquías definidas *a priori*, grupo humano con la facultad de sorprenderse ante sus propios hallazgos.

Quizá el punto de partida en este caso fuese su interés por el peculiar comportamiento de los sistemas no lineales. Uno de sus pioneros, el físico Chris Langton, advertirá que entre el orden y lo aleatorio existe un *espacio intermedio* llamado *complejidad*. La complejidad posee, debe poseer, una serie de reglas fundamentales que será preciso establecer.

Los cambios de estado han sido una preocupación esencial de todos sus integrantes; los arqueólogos los llaman *puntos bisagra*, los biólogos evolutivos *puntuaciones* y los físicos *transiciones de fase*.

### *El Caos y la Complejidad: una totalidad que se resiste a ser dividida*

Hoy resulta obvio que hablar de ciencias de la complejidad es demasiado vago, engloba propuestas que van desde la *Teoría del caos* (Teoría de los sistemas deterministas no-lineales) hasta la *Sinérgica* de Haken (1977), la *Teoría de las estructuras disipativas* de I. Prigogine (1977), la *Criticidad autoorganizada de Per-Bak* (1991), la *Teoría de las catástrofes* de R. Thom, etc.

Bajo estos rótulos se albergan diferentes campos con numerosos puentes entre sí. Los tres apartados principales, en lo que se refiere a la Teoría del Caos, comprenden: *la Teoría de los sistemas dinámicos*, *la Teoría de la autoorganización* y *la Geometría fractal*. Todos tienen en común reconocer al Caos como *parte de un proceso en el que ecuaciones muy simples producen resultados complejos que parecen azarosos*.

Una llamativa novedad: lo simple no es lo opuesto a lo complejo, sino que está en sus fundamentos.

A su vez, la Teoría de la Complejidad no representa, ni debe hacerlo, un espacio delimitado de manera clara. Caos y Complejidad son, en cierto modo, un *continuum* en el que lo cuantitativo prima sobre lo cualitativo, donde las diferencias no son estrictas. Como siempre ocurre cuando aparece un cambio, llegamos al Caos y la Complejidad armados con instrumentos que les son ajenos, instrumentos que sirvieron para modelos y problemas enfocados desde otras perspectivas más clásicas. Esta desarmonía es un lastre obligado. *Estamos determinados a ser complejos y caóticos*. No hay que incurrir en el señuelo de la clasificación estática, afrontamos un fenómeno que califico de *procesual* – Heráclito– y *saltígrado*, como atestigua el concepto central de *emergente*.

Tanto el Caos como la Complejidad se interesan por lo «no lineal», son lo «no lineal». Gracias a los sistemas no-lineales, la matemática se convierte en una herramienta privilegiada para el estudio de ambas teorías. Antes de atrevernos con los sistemas no-lineales, la ciencia estaba acostumbrada a tratar con procesos tersos y predecibles. Desde esa nueva perspectiva, este tipo de sistemas abocaron a un desorden rotulado con el llamativo nombre de *Caos*. Esta denominación, de rancia estirpe mitológica, alumbró un venero de interés sobre fenómenos que pugnaban por hallar explicación; pero al mismo tiempo, dio pábulo a la superficialidad: Caos pudiera ser sinónimo del «todo vale», en una suerte de liberación de las coerciones legales del paradigma positivista.

*Caos* no es lo opuesto a *Positivismo*.

Que lo no-lineal aparezca como caótico no deja de ser una engañosa presentación de un nuevo espacio que posee sus propias normas y encierra el desafío de descubrirlas. El ordenador ha desentrañado y dado forma a intuiciones que antes de su empleo eran simples pálpitos. Gaston Julia, armado de lápiz y papel, no pudo contemplar el fractal de Mandelbrot, surgido por la nueva tecnología. Bajo el *Caos* subyace el *Orden*; desde el aparente *Azar* emerge el *Orden*.

*Orden/Desorden* y los diferentes grados de ambos. He aquí el reto fundamental, lo vimos a partir de E. Morin. *Orden/Desorden* y su equivalente: *Estable/Inestable*. El juego sutil entre las duplas resulta interminable: el orden enmascara y vela el desorden; este, una vez alcanzada una masa crítica, emerge y sitúa al orden en las sombras, como si no existiera, como si hubiera sido arrasado, por la incontenible ola del desorden. Ese fértil lugar, que se resiste a los límites de una definición, difuso por naturaleza, donde la proporción orden/desorden alcanza una relación límite se denominará *frontera del caos, pero también puntuación, o momento bisagra o aún cambio de fase*. Lugar de lo nuevo, de lo inusitado, de la creación y de la emergencia que, según los viejos cánones parece surgir *ex-nihilo*.

La Teoría del *Caos* representa ante todo el *Cambio*, ya lo hemos dicho; no es por lo tanto una ciencia, sino un instrumento que impulsa cualquier proceso científico, en tanto en cuanto la ciencia, si merece ese nombre, aspira al cambio, a ese progreso que la aleje del dogma. Proceso y *Cambio* son dos conceptos que se exigen. Los secretos que encierra el Proceso, que no es solo un mero discurrir, se expresan en la naturaleza del *Cambio*. El *Cambio* traslada de un periodo estable a otro. Pero sucede que la siguiente fase de estabilidad no se puede reducir, desde nuestra perspectiva, a la fase anterior.

La *Adaptación*, una idea nuclear para casi toda ciencia, promueve con carácter de necesidad, un cambio que, se sabe ahora, es un proceso no-lineal. La esencia de lo no-lineal consigue abordar lo que antes se consideraba infame.

Ha sido la física, ayudada como dijimos por la matemática, la primera en introducirse en este universo antes dudoso, gracias a que maneja un menor número de variables. Como era de esperar, llegó más tarde la biología. Las ciencias sociales y la psicología fueron las últimas en apropiarse de esta perspectiva, aunque pueden ser las más beneficiadas, justamente porque el cúmulo de variables que manejan eran incontrolables mediante el modelo positivista.

Los fenómenos lineales se valoran con más facilidad. La cuestión reside en que los tramos lineales de la física son extensos, como demuestra la mecánica newtoniana; no sucede así con la psicología, donde solo los esfuerzos reduccionistas estímulo-respuesta del conductismo han tratado de emular los dictados de la ciencia clásica. Las llamadas *ciencias duras* han penetrado mejor en los espacios de este nuevo paradigma cuando han tenido que enfrentarse con las cuestiones más recientes que ellas mismas engendraron: el problema de los tres cuerpos (Poincaré), las geometrías no euclidianas (Riemann y Lobache-



vsky), el estudio de las formas naturales (Mandelbrot), el bucle predador/presa o las turbulencias y remolinos, que comienzan con Leonardo da Vinci y terminan con la Teoría del Caos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, fundamentales para entender el movimiento de un fluido, son conocidas desde finales del siglo XIX, pero conviene recordar que se ignora la forma de sus soluciones en un régimen turbulento.

En 1963, el ya mencionado meteorólogo del MIT Edward Lorenz desarrolló un modelo de tres ecuaciones diferenciales ordinarias para describir el movimiento de un fluido bajo la acción de un gradiente térmico; a la hora de hallar soluciones numéricas con ayuda de un ordenador, encontró de nuevo el fenómeno de la dependencia a las condiciones iniciales. También los relojes químicos, que estudia Prigogine, las migraciones de hormigas y un largo etcétera.

Las ciencias psico-sociales, preocupadas en adquirir su estatus científico a la vieja usanza, desdeñaron de entrada las nuevas perspectivas que ofrecía la no-linealidad, mucho más imprescindibles, si cabe, en su ámbito que en el resto. Las Teorías de la Complejidad se enfrentan ante todo al *reduccionismo*, ese viejo sueño laplaciano que, de haber sido cierto, hubiera representado el fin de la aventura inaudita del conocimiento. Como el fin de los tiempos, el final de las ciencias ha sido proclamado varias veces, justo en los albores de una nueva eclosión. El *demonio* de Laplace fue conjurado por la mecánica cuántica, pero quedan restos que llevan a pensar que la psique puede ser reducida a la biología y ésta a la física. El *demonio* de Laplace ignora «lo emergente». La emergencia es una muestra del provechoso y prometedor desconocimiento.

La Teoría de la Complejidad tiene su origen, si es que pretendemos darle alguno, en la *vida artificial*. Chris Langton y antes que él las computadoras están en sus comienzos. *Los sistemas oscilan en las fronteras del caos mientras pugnan por otras formas de adaptación al entorno*. Ese es el rasgo distintivo que caracteriza a la complejidad. En esta característica esencial se pone de manifiesto que Caos y Complejidad mantienen estrechos vínculos.

*Las que solemos llamar Teorías del Caos se sitúan ante todo en la perspectiva Orden / Desorden; mientras que las Teorías de la Complejidad se ocupan de los aspectos de la Adaptación. El Sistema Complejo Adaptativo será su noción más nuclear.*

La *organización* en su devenir lleva a la idea de complejidad. Este concepto dista de ser intuitivo y su empleo coloquial induce a confusiones.

La física clásica consideraba que los *sistemas complejos* requerirían auxilio de poderosas herramientas analíticas aptas para acometer descripciones igualmente complejas. Más tarde se reveló lo equivocado de esta suposición. Los sistemas dinámicos *no lineales* mostraron que una superficie compleja podía encerrar subprocesos relativamente simples. La clave reside en la no-linealidad, idea que nos acompañará de manera constante en «lo complejo». Ello dio origen más tarde a la conocida *Teoría del Caos*. En pocas palabras, puede decirse que el Caos es un subconjunto de la complejidad, una complejidad dotada de

extraordinarias peculiaridades, entre otras la de alcanzar su complicación de forma súbita y no progresiva, como en otros sectores lineales de lo complejo.

La Complejidad sigue proporcionando sorpresas: sabemos que una curiosa propiedad de los sistemas complejos es la *auto-organización*, que se alcanza sin necesidad de que intervengan fuerzas externas. Esta afirmación parecería un retorno al vitalismo; nada más incierto. La evolución que ha tenido por santo y seña durante muchos años la idea de la *adaptación* –con las peligrosas connotaciones que adquirió en sociología evolutiva– ha de compartir los privilegios que se le otorgaron con el concepto *auto-organización*. Esta intromisión priva, aún más si cabe, al proceso evolutivo de cualquier intención teleológica. *Auto-organización* y *Adaptación* confluyen, se separan y producen saltos en el proceso conocido como *evolución*.

El siguiente ejemplo, tomado de S. Kauffman, uno de los teóricos que más se ha ocupado de esta cuestión, aclara la naturaleza del fenómeno. Imaginemos una serie de genes dispuestos en red; desde ese instante podemos hablar, siguiendo a Russell, de una estructura. Cada uno de ellos permanece en dos estados posibles: *activo* o *inactivo*, en función del número de entradas que recibe de otros genes. Por ahora priman las funciones. Pensemos que los vínculos entre los mencionados genes se establecen de manera aleatoria. ¿Puede surgir orden de este enredo? El resultado contra-intuitivo es que el orden aparece.

Los sistemas de esta clase se conocen con el nombre de *redes booleanas aleatorias*<sup>6</sup>. Estas estructuras poseen, además, otra propiedad inesperada: cada elemento de la red permanece activo o inactivo en un momento determinado en función de las entradas que recibe: ese es el *estado de la red* en un instante concreto; a continuación ésta pasa a otro estado y así sucesivamente. Pudiera parecer que el número de estados tendrían que ser tantos como los que fueran materialmente posibles para esa red en particular. Una vez más la suposición resulta fallida. La red llega a un punto a partir del cual *gira repetidamente alrededor de una serie de estados*; este hecho recibe el nombre de *ciclo límite* que, en realidad, es un *atractor* del sistema.

### *Sinergética*

Una de las ramas de la naciente complejidad.

En Alemania Haken (1977), casi al mismo tiempo que Prigogine, comenzó a desarrollar un programa de investigación que pretendía revelar algunas leyes generales de la auto-organización y la evolución que son, a su vez, comunes en procesos de naturaleza completamente distinta: física, química, biológica, psicológica y social; lo llamó *sinergética* y se entiende como la *Teoría del comportamiento cooperativo*, que busca explicar algunos de los mecanismos físicos necesarios para la formación de estructuras complejas (Knyaseva, 1998).

---

<sup>6</sup> Que serán tratadas en el Tomo II de esta obra.

En la ciencia moderna la sinérgica debe su desarrollo a la extraordinaria producción de investigaciones que ha proporcionado Haken unido a los muchos talleres que ha patrocinado en las tres últimas décadas. Trata de la emergencia de características dinámicas y/o evolutivas en los sistemas complejos donde la totalidad no es la simple suma de sus partes. Por lo tanto una propiedad emergente pertenece un nivel superior de descripción que la de sus elementos subyacentes. Las propiedades emergentes poseen leyes genuinas propias como resulta de en biología, ecología, sociología etc. Nekorkin, V. I., García Velarde, M. G. *Energetic Phenomena in Active lattices*. (2002, p. 1).

La *sinérgica* debe ser vista como un estado desarrollado del análisis de los sistemas estructurales y la cibernética tradicional. Mientras esta se ocupa del funcionamiento de sistemas complejos utilizando un modelo abstracto de *caja negra*, la sinérgica estudia algunos mecanismos para la formación de estructuras complejas, trata de ver dentro de la *caja negra*. La cibernética elabora algoritmos y métodos para el control de los sistemas; la sinérgica analiza el proceso de auto-control y auto-organización de los sistemas complejos (Knya-seva, 1998). El estudio de Haken sobre el comportamiento cooperativo tuvo su origen en las investigaciones sobre la radiación coherente del *láser*. El *láser* es un ejemplo paradigmático de la sinérgica.

#### *Criticidad auto-organizada*

La *criticidad auto-organizada* admite esta definición: los sistemas complejos grandes y alejados del equilibrio, formados por muchas partes interactuantes, espontáneamente evolucionan hacia un punto crítico. (Solé 1999, pp. 158).

En el estado de *criticidad auto-organizada*, existe un sistema complejo con su propia dinámica emergente, este estado no puede ser anticipado a partir de las propiedades de las unidades individuales (granos de arena). En un contexto ecológico, la adición de una nueva especie podría llevar a los ecosistemas cerca de un estado crítico. En las complicadas redes de comunicación que existen en las comunidades, podemos preguntarnos cuándo su coherencia puede empezar a quebrarse. Goerner (1992) se ha ocupado mucho de esta cuestión.

Una metáfora simple ilustra esta noción: si añadimos lentamente arena, un grano por vez, al principio tenemos una pila plana de arena y los granos permanecen donde caen, son básicamente independientes y su comportamiento es descrito por la fuerza de gravedad y la de fricción. Pero, en tanto que la pendiente se incrementa, se alcanza un régimen donde avalanchas que involucran los granos en interacción, ocurren todo el tiempo. El montón de arena, no las especies individuales, será el objeto relevante a largo plazo. (Solé 1999, pp. 158).

#### LAS TEORÍAS DEL CAOS Y LA COMPLEJIDAD: RELACIONES Y DIFERENCIAS

Ambas, desde perspectivas distintas, describen el modo en que los sistemas físicos y biológicos cambian a lo largo del tiempo de un estado organizativo a otro. Mientras las teorías de la causalidad lineal abordan los estados estables o

inestables de un sistema determinado, las que nos ocupan aquí –de tipo no lineal– se encuentran con un sistema vivo, con vertientes estables e inestables.

Veamos este proceso evolutivo desde la óptica de la *Teoría del Caos* para después introducir modificaciones que propone la *Teoría de la Complejidad*.

*El Caos es un comportamiento aperiódico a largo término en un sistema determinista que exhibe dependencia sensitiva de las condiciones iniciales.*

Bütz (1997) describió a los sistemas dinámicos como producto de la evolución de cuatro estados:

- a) Estable.
- b) Bifurcación.
- c) Caos o Complejidad.
- d) Nuevo orden adaptativo de mayor complejidad.

La Teoría del Caos narra los estados de un sistema a lo largo del espacio y el tiempo. Es necesario traer a colación una serie de conceptos que se verán a lo largo de esta obra.

#### *Estado estable*

Se considera «estado estable de un sistema» a la organización preferida por los elementos que lo componen dentro de su contexto ambiental. Por ejemplo, el agua aparece en tres estados: sólido, líquido y en forma de vapor. Un sistema permanece estable hasta que se altera por influencias internas o externas.

#### *Punto de bifurcación*

Es el punto en el que la alteración provoca la desestabilización del sistema. Cuando un sistema se bifurca, la forma estable anterior *desaparece* y da paso a otra *nueva*. Cada punto de bifurcación, llevará al sistema *dos veces el tiempo* para volver al estado anterior, si es que ello es posible y no lo es en los sistemas biológicos. En nuestro ejemplo, la temperatura ambiental constituye el estímulo que provoca la desestabilización del agua en estado sólido. Los aumentos de temperatura la convertirán en líquido y en vapor. Pueden existir muchos puntos de bifurcación.

#### *Estado atractor*

Aquel en que los esquemas serán atraídos en un contexto particular. Esa convergencia es fácil de observar y difícil de justificar.

#### *Estado caótico*

A medida en que la inestabilidad de un sistema aumenta, aparece el *estado caótico*. A nivel local, no se puede predecir el estado futuro del sistema. No obstante, existe un orden subyacente en sus estados emergentes que no se derivan de manera lineal del anterior. En el curso de una conferencia internacional sobre el Caos, que tuvo lugar en 1986, se definió el «estado caótico» como «el comportamiento estocástico que acontece en un sistema determinista (Perna &

Masterpasqua 1997, p. 9). En otras palabras, los algoritmos no lineales determinan qué estados *organizan* a partir de las relaciones aparentemente caóticas de los elementos de un sistema.

### Atractor

El término atractor es difícil de definir de manera rigurosa. No existe un acuerdo total en lo que pueda ser. En términos generales, se dice que es un conjunto en el que convergen todas las trayectorias vecinas. Un atractor es un conjunto cerrado «A» que presenta las siguientes propiedades:

- 1.- *Es invariante*: cualquier trayectoria  $x(t)$  que comienza en «A» se mantiene en «A» todo el tiempo.
- 2.- *Atrae a un conjunto abierto de condiciones iniciales*: existe un conjunto abierto «U» que contiene a «A» de tal modo que si  $x(0) \in U$ , entonces la distancia de  $x(t)$  a «A» tiende a cero si  $t \rightarrow \infty$ . Lo que significa que «A» atrae a todas las trayectorias que empiezan lo suficientemente cerca de este. El conjunto mayor «U» se denomina *cuenca de atracción* de «A».
- 3.- *Es mínimo*: no existe un subconjunto de «A» que satisfaga las propiedades 1 y 2.

Dentro de estos estados caóticos los elementos que componen un sistema y su entorno interactúan de diferentes formas, compiten entre sí y forman una organización suficientemente estable capaz de atraer los elementos restantes a su estructura. Estas formas estables se denominan *atractores*; pueden ser considerados como una estructura semejante a un torbellino en el interior que ocupan los elementos organizados. *El caos es el producto del estado que crean las alteraciones de las experiencias de un sistema cuando se deslizan de un atractor a otro*. La importancia de este estado de transición estriba en que los elementos desestabilizados interactúan en forma diferente, lo que permite al sistema evolucionar.

La emergencia de un atractor más complejo en un sistema representa la aparición de actividad auto-organizada de sus elementos durante el estado caótico. Las formas en que esos elementos interactúan a nivel microscópico se convierten en los algoritmos mediante los que el sistema se auto-organiza a nivel macroscópico.

### Fronteras del Caos

En la Teoría de la Complejidad, la *fase transicional caótica* se reemplaza con la noción de que *los sistemas dinámicos vivos existen y se mantienen en las fronteras del caos, en un equilibrio entre la predicción y el caos*.

En lugar de atravesar el Caos para adaptarse a un medio siempre cambiante, los numerosos elementos que forman un sistema complejo interactúan entre sí y con el medio de manera tan intrincada que emerge un orden en constante evolución.

Estos sistemas complejos adaptan su entorno en constante cambio *sin disolverse en el Caos* debido a que son sistemas *abiertos o disipativos*. En un siste-

ma de ese tipo, algunos elementos mantienen constante interacción con su medio, de manera que la energía y la información se transfieren de forma continua entre los elementos del sistema y su entorno; además existen *lejos del equilibrio*. Los sistemas cerrados, que impiden el intercambio de energía o información están sujetos a la entropía: se equilibran y, con el tiempo, se desintegran.

Los *sistemas complejos adaptativos* realizan constantemente adecuaciones a sus medios respectivos para permitir el cambio al mismo tiempo que se mantiene el orden. Las adaptaciones se basan en diversos factores que conservan a un tiempo la estabilidad y apuntalan la diversidad y el crecimiento. Los sistemas complejos tienden a crecer en formas *auto-similares*.

Las estructuras previas se utilizan como modelos para el desarrollo posterior. Estos algoritmos son las reglas que emergen a partir de la forma que los elementos han hallado para lograr la pertinente interacción. Se convierten en modelos que el sistema emplea para su futuro. La competición entre los elementos y esquemas para lograr recursos estimula el crecimiento.

*Tanto el Caos como la Teoría de la Complejidad describen la evolución y el desarrollo de los sistemas dinámicos.* Que empleemos una u otra depende del tema objeto de investigación. Los estudiosos de los problemas neurológicos, cognitivos y afectivos tienden a utilizar la Teoría del Caos para dar cuenta de la organización y transición entre estados del ser, las percepciones, cogniciones y estados afectivos (Butz, 1997; Freeman, 1991; Lewis & Junyk, 1997). Por el contrario, cuando el objeto de la investigación es un sistema complejo como la persona, su desarrollo y las relaciones con los demás y el medio -lo que incluye el proceso terapéutico- nos inclinamos por la Teoría de la Complejidad (Butz, 1997; Kauffman, 1995; Mahoney & Moes, 1997; Thenlen & Smith, 1994).

### *Sistemas complejos adaptativos*

Existe un constante intercambio de energía e información entre un sistema organizado y su entorno. En la medida que este último cambie, la interacción de sus elementos se adaptará al mencionado cambio y, por consiguiente, el sistema evoluciona. Las modificaciones del sistema afectarán al entorno, los sistemas complejos son adaptativos no solo por su respuesta a los cambios del medio, sino también porque influyen en éste para configurar su estado de organización concreto, (Holland 1995). En la medida en que los elementos de un sistema se auto-organizan para adaptarse a un contexto fluido, oscilarán entre la estabilidad y el orden de una parte y la inestabilidad y el Caos de otra.

El Caos y las Teorías de la Complejidad describen el modo en que los sistemas complejos adaptativos se organizan y evolucionan. *Un sistema complejo adaptativo es un estado ordenado de elementos que componen un medio.*

Veamos algún ejemplo: el estado «agua líquida» se crea de la sopa de elementos que constituye la atmósfera; surge por unión de dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno. En otro orden de cosas, en el repertorio de compor-

tamientos de la madre y su bebé la experiencia de amamantamiento emerge como estado organizado cuando ambos traban una interacción concreta.

La forma que adopta un sistema complejo adaptativo refleja los modos en que sus elementos interaccionan entre sí. Un sistema de este tipo requiere un aporte constante de energía o información para mantener activas las conexiones entre sus elementos, cuyas interacciones integran el sistema (Kauffman 1995).

El trayecto que siguen estos sistemas dinámicos no se enfoca hacia una forma óptima de organización, como pudiera ser un estado equilibrado de tipo estático, sino que lo hace en pos de un incremento de orden y complejidad, (Waldrop 1992).

Un sistema complejo adaptativo contiene muchos tipos de elementos que llamaremos *agentes*. El funcionamiento del mismo no está controlado de forma jerárquica, sino que proviene de la interacción de muchos elementos, cada uno de estos puede, a su vez, ser un sistema complejo adaptativo. El comportamiento del sistema considerado como un todo es el producto final de esas múltiples interacciones.

Dentro de cada sistema complejo adaptativo, sus propios agentes son subsistemas de otro conjunto más amplio. Por ello, son concebidos como ordenados jerárquicamente (Eidelson 1997). Por ejemplo, el sistema de representaciones mentales que conforma la actividad psíquica es un subsistema integrado en la diada analista/paciente. La actividad del supersistema paciente/analista es, al mismo tiempo, un subsistema de la constelación Paciente/Figuras parentales, supersistema de las interacciones Madre/Paciente, Padre/Paciente.

Cada miembro perteneciente a un sistema complejo adaptativo se modifica en la medida en que gana experiencia por su adaptación al medio (Holland 1995). El sistema como totalidad utiliza estos modelos internos para realizar inferencias causales y predicciones sobre las futuras estrategias adaptativas, (Eidelson 1997). Al producirse esta íntima relación entre un sistema y su contexto *no existe medio de predecir cuál será el estado óptimo del mencionado sistema fuera del contexto en el que se encuentra*. La citada condición óptima es una organización adaptativa del contexto alejada de un estado rígido que se reorganiza en función de aspectos internos de su propia estructura y de los cambios del entorno, (Kauffman 1995).

Interesa ahora decir que en el campo de la biología los sistemas integrados por organismos vivos se *auto-organizan*. Concepto clave que contribuye decisivamente a avanzar una noción de estructura que conviene al campo de lo biológico y que se caracteriza por ser *energéticamente abierta y organizativamente cerrada*.

H. von Foerster (1911-2002) fue el primero en expresar la necesidad de introducir un principio de orden a partir del ruido –en tanto que desorganización– para dar cuenta de las propiedades más singulares de los organismos vivos como sistemas auto-organizados, entre ellas su capacidad de *adaptación*.

*Los sistemas auto-organizados más allá del equilibrio* parecen tener vida propia; pueden crear nuevas estructuras, cuyos elementos se conectan de forma no lineal. Entre ellos citaremos los *hiperciclos* (M. Eigen 1971), conocidos también como *ciclos catalíticos*.

Con tiempo suficiente y un continuo flujo de energía, los ciclos catalíticos tienden a establecer relaciones por sí mismos; es decir a formar auténticas estructuras. *Las enzimas producidas en un ciclo actúan como catalizadores en el ciclo siguiente*. Crean cada vez estructuras más complicadas y pueden *auto-replicarse*. Probablemente sean éstos los sistemas químicos que anunciaron la emergencia de la vida. Eigen utiliza para describirlos la perspectiva evolutiva darwiniana y considera a este fenómeno como *prebiológico*.

S. Kauffman (1993, 2000) se ha ocupado *in extenso* del problema estudiando redes hipotéticas de reacciones químicas llamadas *grafos reactivos*.

Para terminar, diremos que la organización se relaciona con la clase y la estructura con los objetos que integran la mencionada clase. La primera representa lo que de común tienen las estructuras que pertenecen a su campo de dominio, sus aspectos invariantes. Una organización determinada es *el campo de dominio donde establecen relaciones metafóricas las estructuras que participan de la citada organización*.

No-linealidad, Caos, Sistemas Complejos tal es la tela de araña que forma el naciente paradigma de la complejidad que se desarrolla en las siguientes páginas. Comencemos por la física.