De la Teoría General de Sistemas a las Ciencias de la Complejidad

2.- Teoría General de Sistemas y Dinámica de Sistemas: su aplicación a la Teoría Organizativa.

2.1.- Introducción.

Nos interesa en este capítulo hacer un repaso a las principales aportaciones que, tanto la Teoría General de Sistemas, como la Dinámica de Sistemas, disciplina sustentada en la noción de 'sistema dinámico', han realizado en orden a la contribución de una mejor comprensión de las organizaciones.

A partir de la aplicación de la primera a la Teoría Organizativa, la caracterización de la organización como sistema se ha mostrado muy útil. En concreto, a partir de determinadas fechas, que podríamos situar en la década de los sesenta, las concepciones de la organización parecen no poder prescindir de una consideración de éstas como sistemas abiertos. "En constante intercambio con su entorno" es una frase muy repetida desde entonces en la Teoría Organizativa. Y desde la segunda, la Dinámica de Sistemas, conceptos como los de bucles de realimentación o demoras en la realimentación, también han tenido una implantación fuerte en el entendimiento de procesos que ocurren dentro de la organización. Por ejemplo, en cómo las demoras inciden en las oscilaciones en los pedidos, o la relevancia de los bucles de realimentación para la comprensión de los periodos de estabilidad o crecimiento.

Al finalizar este capítulo, debe quedarnos dibujada una clara imagen acerca de las organizaciones como sistemas abiertos, como sistemas en constante intercambio con el medio que les rodea, y como sistemas sociales, con características diferenciales también propias frente a otros tipos de sistemas abiertos. Con ello, esperamos recoger las aportaciones más clásicas que desde el pensamiento sistémico se han realizado en el marco de la Teoría Organizativa.

2.2.- Teoría General de Sistemas.

2.2.1.- El concepto de Sistema.

Podríamos definir un sistema como un '*complejo de elementos interactuantes*' (Bertalanffy, 1945, recogido en 1968, pág. 56, la cursiva es nuestra). Pero la definición anterior, carece de un matiz importante: de cuyas interacciones surge un *comportamiento como un todo* (Hall y Fagen, 1956). De otra forma, un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados y que presentan un cierto carácter de totalidad más o menos organizada.

De este modo, podemos hablar de tres características estructurales básicas de todo sistema: uno, los *elementos* que lo componen, dos, las *relaciones* entre esos elementos, y tres, los *límites* del propio sistemas que determinan que elementos pertenecen al mismo y cuáles no (Martínez y Requena, 1986).

Los teóricos de sistemas coinciden en que el concepto de sistema no está limitado a entidades materiales sino que puede aplicarse a cualquier 'todo' que consista en una serie de elementos que interactúan (Bertalanffy, 1962; Rappoport, 1985). En este sentido, Bertalanffy (1972) diferenciaba entre *sistemas reales* y *sistemas abstractos*. Por sistemas reales podemos entender entidades percibidas o deducidas de la observación, cuya existencia es independiente del observador. Un grupo con sus diferentes miembros nos puede servir de ejemplo. Por sistemas abstractos entendemos unos sistemas conceptuales -esencialmente constructos simbólicos- que tienen correspondencia con la realidad, pero cuya existencia depende de su relación con el observador. Como ejemplo podemos tomar el de un campo científico con sus diferentes teorías.

El interés por la concepción de sistemas y su estudio nace en forma de disciplina, la *Teoría General de Sistemas*, a finales de los años 20 de la mano del biólogo alemán Ludwig von Bertalanffy. Desde entonces, y hasta su fallecimiento en 1972, Bertalanffy ha expuesto los intereses fundamentales de esta Teoría General de Sistemas en tanto a la *formulación y derivación de aquellos principios válidos para todos los sistemas en general* (1955). Con ello, se desvela una clara pretensión por parte de esta teoría de unificación de la ciencia (o de las ciencias si se prefiere), en tanto al isomorfismo que se producen en los diferentes niveles o ámbitos disciplinarios (significativo es, en este sentido, el título del conocido artículo de Boulding: *General Systems Theory-The Skeleton of Science*, 1956). Se trataría de una disciplina que atravesaría transversalmente el resto de las ciencias con el propósito de tratar con los principios isomorfos que tienen lugar entre ellas, utilizando para ello el formalismo del concepto de sistema.

Por otra parte, la Teoría General de Sistemas halla su objeto de estudio en las complejidades organizadas. Como argumentaba Weaver (1948), uno de los creadores junto con Claude Shannon de la *teoría de la información*, la física clásica newtoniana había tenido gran éxito en el desarrollo de una teoría de la complejidad no organizada, arraigada en las leyes del azar y la probabilidad y en la segunda ley de la termodinámica. En contraste, el problema se había trasladado al entendimiento de las complejidades organizadas, en las que conceptos como los de 'totalidad', 'directividad', 'teleología' y 'diferenciación' son vitales y, por otro lado, ajenos a la física habitual. Sin embargo, son conceptos nucleares en ciencias biológicas, del comportamiento o sociales; centrales para el estudio de organismos vivos o grupos sociales[1].

Más que exponer otros aspectos de la Teoría General de Sistemas, es de nuestro inmediato interés perfilar lo que podríamos llamar *pensamiento de sistemas* como la gran aportación de la Teoría General de Sistemas al pensamiento científico actual.

2.2.2.- Pensamiento de Sistemas[2].

En primer lugar, *la Teoría General de Sistemas contempla cualquier fenómeno como que forma parte de un sistema y, que al menos potencialmente, también puede serlo por sí mismo*. Así, por ejemplo, un individuo puede ser considerando un elemento de un sistema mayor, como pueda ser un grupo de personas, y a su vez, un sistema conformado por un conjunto de, por ejemplo, células. La clasificación en ocho niveles de la *teoría de los sistemas vivos* (Miller, 1978) tales como células, órganos, organismos, grupos, organizaciones, comunidades, sociedades y sistemas supranacionales es ilustrativa en este sentido: cada nivel contiene a los sistemas del nivel inferior.

Por ello, es posible que sobre una misma realidad puedan definirse numerosos sistemas (Martínez y Requena, 1986), lo cual obedecerá a razones del tipo intereses o finalidad del observador, experiencia de éste, etcétera. Ello conduce a una concepción que podríamos denominar *perspectivismo* (Bertalanffy, 1955) sobre la realidad. Como dijo una vez Aldous Huxley (recogido por el propio Bertalanffy), el mundo es como un pastel de helado napolitano cuyos niveles -el físico, el biológico, el social, el moral- corresponden a las capas de chocolate, fresa y vainilla. La fresa no es reducible al chocolate. Es decir, y como diríamos hoy, desde la Teoría General de Sistemas, se está argumentando en la línea de una visión construccionista de la realidad: el sujeto construye al objeto. Bertalanffy veía en este perspectivismo una actitud para el científico que se oponía al reduccionismo imperante de su época, en tanto que suponía la desmitificación de las visiones científicas tradicionales.

[1] El concepto de teleonomía o teleología es rechazado de plano por autores como Maturana y Varela (1973) en su teoría de los sistemas autopoiéticos que veremos en el capítulo 3. Aquí baste decir que, para estos autores, no es un concepto necesario para dar cuenta de lo vivo.

[2] En la literatura más reciente, suele hablarse de Pensamiento de Sistemas (*systems thinking*) en referencia a lo que posteriormente veremos bajo el epígrafe de Dinámica de Sistemas. Preferimos decantarnos por incluir bajo la denominación 'pensamiento de sistemas' aspectos más genéricos, y también más clásicos, y no vincularlo solamente a los bucles de realimentación y demoras en los flujos de realimentación que luego veremos como los conceptos básicos de la Dinámica de Sistemas.

En segundo lugar, se ha de remarcar el *interés* de la Teoría General de Sistemas *por los problemas de relación, de estructuras y de interdependencia, más que en los atributos constantes de los objetos* (Bertalanffy, 1968; Buckley, 1968; Rappoport, 1985). Ello es consecuencia del interés de la Teoría General de Sistemas por los sistemas abiertos, que luego caracterizaremos, en los que el dinamismo, la interacción con elementos y otros sistemas externos al mismo, es característica definitoria y, también su interés por los sistemas sociales en los que se da una fuerte interrelación entre sus elementos (Forrester, 1961; Aracil, 1983). En este sentido, el pensamiento sistémico es una ayuda en el entendimiento de la complejidad de estos sistemas en cuanto a su focalización en estos patrones de interacción (Espejo, 1994), en las relaciones de interdependencia entre los elementos constitutivos del sistema.

En tercer lugar, el pensamiento de sistemas enfatiza la *aparición de propiedades emergentes* no deducibles de los elementos del sistema por separado. El emergente es fruto de las interacciones entre los elementos del sistema (Langton; conversación de Chris Langton con R. Lewin, recogida en Lewin, 1992, págs. 23-27). Tomando un ejemplo desde la ecología, una colonia de hormigas es capaz de llevar a cabo tareas de gran complejidad, como explorar su entorno, construir galerías o decidir la fuente de alimentos entre varias posibles a escoger. Pero, considerada una por una, ninguna hormiga puede acometer, por sí sola, semejantes tareas. Es por ello que pueda afirmarse que el comportamiento social del hormiguero emerge a partir de las interacciones entre las hormigas, y no es reducible a las propiedades de un individuo de la colonia (Solé et al., 1996).

El pensamiento de sistemas se opone, en este sentido, al pensamiento analítico heredado de la física newtoniana. La aplicación de los procedimientos analíticos de la ciencia para el estudio de cualquier sistema depende de: a) que no existan interacciones entre las partes -o que éstas sean poco importantes o desechables-. Con esta condición es posible el estudio de las partes por separado, para luego volverlas a juntar. Y b) que las relaciones entre las partes sean lineales, ya que así se garantiza la condición de aditividad por la cuál la suma de los procesos parciales obtiene el proceso global (Bertalanffy, 1968).

Además, acontece que estas propiedades emergentes acaban influyendo en los propios elementos del sistema. Considerando otro ejemplo, éste dentro del campo de la psicología social, podemos pensar en fenómenos grupales como la cohesión grupal: de las interacciones locales de los miembros surge una propiedad emergente, la cohesión, no reducible al comportamiento de los miembros por separado. A su vez, la cohesión influye en los futuros procesos grupales. El dicho aristotélico de que ‘el todo es más que la suma de sus partes’ adquiere transparencia.

Por esto, y en cuarto lugar, el pensamiento de sistemas aboga por una *visión holística* en el estudio de los sistemas como entidades, más que como conglomerados de partes (Ackoff, 1959). Ello no quiere decir que el pensamiento de sistemas abandone la propensión al análisis, sino que más bien, combina éste junto con la elaboración de síntesis, más propias del holismo (Aracil, 1986).

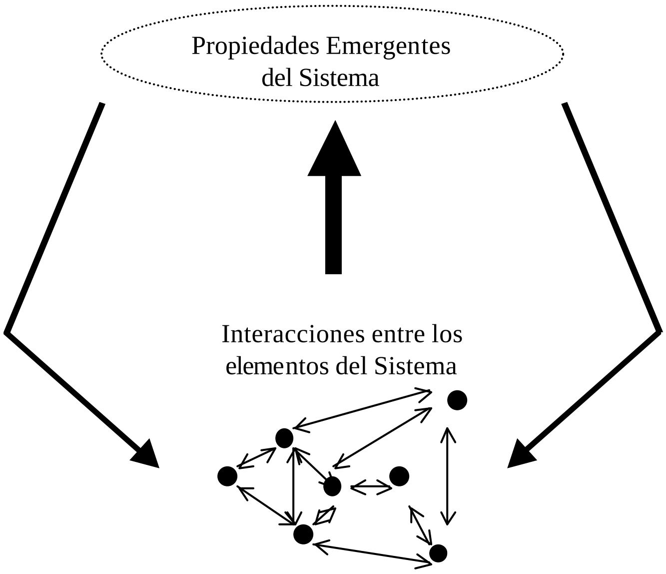


Figura 1: Aparición de propiedades emergentes de las interacciones entre los elementos del sistema y que acaban afectando a éstas.

En quinto lugar, en todo sistema no todos los puntos de influencia tienen el mismo peso con vistas a una intervención para la producción de cambios en el sistema. Hay puntos en los que la palanca ejerce una mayor presión (Briggs y Peat, 1989; Senge, 1990; Senge y Sterman, 1992). Este *principio de la palanca* nos enseña que pequeños cambios pueden producir grandes resultados, y nos insta a buscar estos puntos en los que los actos y modificaciones en estructuras pueden conducir a mejoras significativas y duraderas.

2.2.3.- Tipos de sistemas.

2.2.3.1.- La Jerarquía de Complejidad de K. Boulding.

En 1956 el economista Keneth Boulding proponía una clasificación de sistemas muy conocida en nuestra disciplina (Boulding, 1956a; 1956b; también puede verse en Buckley, 1968; o una buena síntesis en Pondy y Mytroff, 1979). Boulding distinguía nueve niveles distintos de sistemas, ordenados de menor a mayor *complejidad*, entendiendo por complejidad tanto el *grado de diversidad o variabilidad de los elementos* que conforman el sistema como la *aparición de nuevas propiedades sistémicas*. Estos nueve niveles, que van desde las estructuras estáticas hasta sistemas aún por descubrir, serían los siguientes:

1. Las *estructuras estáticas* (frameworks[3]), como por ejemplo un cristal, una roca, un mapa de una ciudad, una representación gráfica mediante organi-

[3] Recogemos entre paréntesis la denominación dada originalmente por Boulding.

grama de una organización, etcétera. Se trata de sistemas estáticos, con propiedades estructurales. Aunque una estructura estática pueda ser muy complicada (por ejemplo, un organigrama con numerosos niveles tanto horizontales como verticales) no es compleja en el sentido de Boulding. No hay gran variabilidad de elementos y tampoco hay una pléyade de propiedades emergentes propias del sistema.

2. *Sistemas simples dinámicos* (clockworks), como máquinas simples que responden al modelo de física newtoniana. La atracción entre dos cuerpos o el movimiento planetario, por ejemplo, se hallarían dentro de esta categoría. La diferencia con respecto a las estructuras estáticas (nivel 1) radica en la incorporación del elemento dinámico.

3. *Sistemas cibernéticos* (control mechanism or cybernetic systems) en los que se incluyen mecanismos de control mediante dispositivos de feedback, como en un termostato, o en los procesos homeostáticos de un organismo vivo. En este nivel, los sistemas son capaces de procesar informaciones a un nivel que les permiten autoregularse. La aplicación que Vancouver (1996) realiza de la *teoría de los sistemas vivos* (*Living Systems Theory*) de Miller (1955, 1978) al ámbito de la conducta organizativa, constituye un excelente ejemplo sobre sistemas que se autorregulan gracias a sus propiedades cibernéticas[4].

4. *Sistemas abiertos* (open systems) como estructuras con una capacidad de auto-perpetuarse. Una célula es un excelente ejemplo de sistema abierto. Asimismo, y a diferencia de los sistemas cibernéticos (nivel 3), los sistemas abiertos mantienen una diferenciación interna gracias a la relación que mantienen con el entorno (importación de entropía negativa, aspecto en el que mas adelante entraremos en detalle) lo cual no les sitúa en una posición de permanente equilibrio estable (como en los sistemas cibernéticos). Esta diferenciación es necesaria a fin de que el sistema pueda tener una adecuada relación con el entorno, en tanto que éste también presenta facetas diferenciales. En la célula, por seguir con el ejemplo, se precisa el procesamiento de información térmica, de información alimenticia, de información de posibles agresores externos, etcétera. En este sentido, el cibernético inglés W. Ross Ashby formuló la *ley de variedad requerida* según la cuál la diversidad interna de un sistema abierto coincide en variedad y complejidad con la del entorno con el que interactúa (Ashby, 1956). Además, y repito dada su importancia, en los sistemas abiertos existe la capacidad de autorreproducción gracias a la generación de un código genético. El salto con respecto al nivel 3 es algo más que considerable.

5. *Organismos inferiores* (genetic societal level) que presentan una diferenciación creciente dentro del sistema (diferenciación de funciones en el or-

[4] Dicho trabajo, aunque recoge las características de diferenciación e integración propias de los sistemas vivos, recurre continuamente a los mecanismos de feed-back (y mayoritariamente de tipo negativo) para caracterizar esta 'vitalidad' olvidando otros aspectos clave de este tipo de sistemas como la emergencia de procesos, los fenómenos autoorganizativos o la capacidad de perpetuarse.

ganismo), y en los que se puede distinguir entre la reproducción del propio sistema y el individuo funcional (a diferencia de los sistemas de nivel 4). Una planta, por ejemplo, genera semillas en las que va interno el código genético para el posterior desarrollo del nuevo organismo. Una característica esencial, por tanto, de los sistemas de nivel 5, es la existencia de mecanismos de reglas generativas (en el sentido de generación y desarrollo).

6. *Sistemas animales* (animal level), en los que hay una mayor capacidad en el procesamiento de la información del exterior -evolución de subsistemas receptores, de un sistema nervioso, etcétera- y en la organización de la propia información en cuanto a la generación de una imagen o conocimiento estructurado sobre el entorno. Por otro lado, en los sistemas animales hay una capacidad de aprendizaje, y una primera capacidad de conciencia sobre sí mismos. Aún así, no puede decirse estrictamente que los sistemas animales tengan una capacidad de autoconciencia en tanto a que no conocen qué conocen. Para este segundo nivel de conciencia -si se me permite llamarlo así- se necesita de una capacidad de procesamiento simbólico de la información que los sistemas animales no poseen.

7. *Sistema humano* (human level), que incluye las capacidades de autoconciencia, autosensibilidad, y del simbolismo como medio de comunicación. Todo ello gracias a la capacidad de manejo de una herramienta como es el lenguaje. Un sistema humano es capaz de preguntarse a sí mismo sobre cómo se ve a sí mismo, sobre qué imagen tiene del entorno, y actuar en consecuencia.

8. *Sistemas socioculturales* u *organizaciones sociales* (social organizations), o conjuntos de individuos con capacidad de crear un sentido social de organización, de compartir cultura, historia y futuro, de disponer de sistemas de valores, de elaborar sistemas de significados, etcétera. El nivel 8 recoge, como puede apreciarse, a los sistemas de nivel 7 en interacción, con lo cual aparecen, emergen, las ya mencionadas, y nuevas, propiedades sistémicas.

9. Por último, Boulding dejaba abierta la posibilidad a un noveno nivel en el que se hallarían sistemas hoy no descubiertos o no existentes, pero que bien podrían convertirse en realidades en futuros próximos. Este nivel noveno sería, obviamente, todavía más complejo que los precedentes.

La clasificación de Boulding o *jerarquía de complejidad* (según su propia denominación) permite tomar conciencia del salto existente entre los modelos teóricos desarrollados y los modelos empíricos. De este modo, Boulding afirmaba que no se han desarrollado modelos teóricos adecuados más allá del nivel 4, y que los modelos empíricos son deficientes en prácticamente todos los niveles (recordamos que este escrito es de 1956). Igualmente, y centrándose en la ciencia del *management*, Boulding argumentaba que aunque las organizaciones pertenecen al nivel 8, en su estudio no se han desarrollado modelos más allá de los niveles tercero y cuarto (sistemas cibernéticos y sistemas abiertos respectivamente).

Tabla 1: Jerarquía de Complejidad de K. Boulding (1956).

Complejidad	
-	1.- Estructuras estáticas
	2.- Sistemas simples dinámicos
	3.- Sistemas cibernéticos
	4.- Sistemas abiertos
	5.- Organismos inferiores
	6.- Sistemas animales
	7.- Sistema humano
	8.- Sistemas socioculturales
+	9.- Complejidades por descubrir

Por otra parte, esta jerarquía de complejidad puede concebirse de tal manera que cada nivel incluye a todos los precedentes. De este modo, es posible la aproximación a niveles más complejos a través de modelos elaborados desde niveles menos complejos. Por ejemplo, para el estudio de una organización social (nivel 8) pueden concebirse modelos cibernéticos (nivel 3), modelos que tengan en cuenta las relaciones organización-entorno en tanto a los intercambios de energías e informaciones (nivel 4), o modelos que enfaticen la capacidad de procesamiento de la información de los individuos (nivel 7). En todos los casos, estas aproximaciones serán reducionistas en tanto a una limitación de carácter epistemológico: para afrontar el estudio en su globalidad de un determinado nivel, se necesitan enfoques que tengan presentes las características sistémicas propias de ese nivel.

Dicho lo anterior, el estudio del fenómeno organizativo, en su complejidad, debería ser abordado desde modelos que tengan presentes, además de las características sistémicas propias de los diferentes niveles que engloba (del 1 al 7 en la jerarquía de Boulding), las características sistémicas ya apuntadas del nivel 8. Ello no debe negar, en modo alguno que, desde modelos elaborados en otros niveles inferiores, se de cuenta de manera apropiada de *principios isomorfos* (recordamos, los que busca la Teoría General de Sistemas) y generales aplicables al nivel 8.

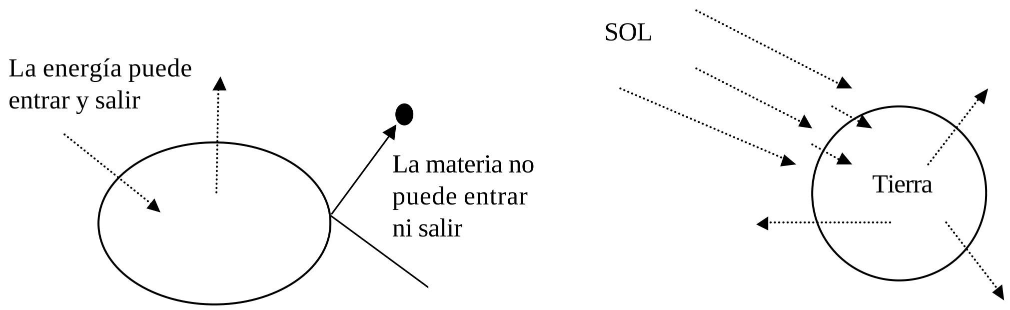
Por ejemplo, es obvio que en las organizaciones hay mecanismos de feedback (nivel 3). Un ejemplo: restricción en el gasto en periodos de recesión. Y también en la conducta organizativa: en la teoría del establecimiento de metas formulada por Latham y Locke (1991) se enfatiza el papel de este establecimiento de metas en la autorregulación de la conducta del sujeto, con vistas a la consecución de resultados, por citar otro ejemplo. Y es útil la generación de modelos organizativos o modelos de conducta organizativa en este sentido. Remitimos a la revisión de Vancouver (1996) sobre las principales contribuciones teóricas en conducta organizativa utilizando procesos cibernéticos que se han desarrollado en las dos últimas décadas. Ahora bien, otra cosa muy distinta es que estos modelos pretendan ser explicativos del comportamiento organizacional en su globalidad.

2.2.3.2.- Sistemas Aislados, Sistemas Cerrados y Sistemas Abiertos.

Otra clasificación de tipos de sistemas nos la ofrece la diferenciación tradicional que en física se hace entre sistemas aislados, sistemas cerrados y sistemas abiertos (e. g. Rumer y Ryvkin, 1980). La característica crítica para diferenciar unos de otros lo representa los intercambios de energía y/o materia con el medio. Comencemos, por motivos didácticos, por los segundos.

En los *sistemas cerrados* se producen intercambios de energía, pero no de materia, con el medio ambiente circundante. Un recipiente cerrado, con cualquier contenido en su interior, intercambia temperatura con el exterior (energía), pero no materia. El propio planeta Tierra, intercambia temperaturas, radiaciones y otros tipos de energías con el exterior, pero no materia (excepción hecha de alguna ocasional caída de meteoritos y algún lanzamiento espacial).

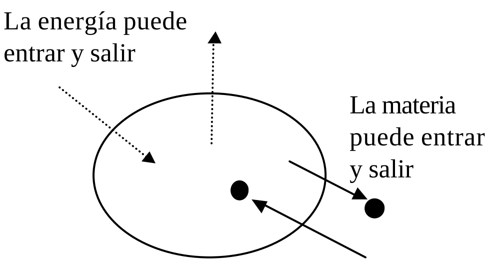
Figura 2.- Sistemas Cerrados:

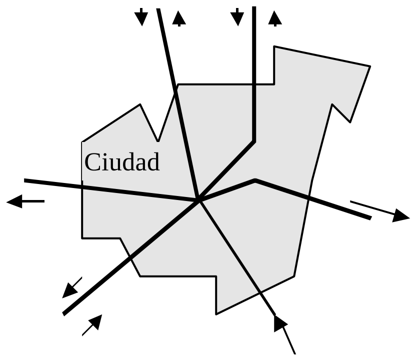


En los *sistemas abiertos* se dan tanto intercambios de energía como de materia con el exterior. Un organismo vivo sería un ejemplo prototipo de ellos. Una ciudad, es otro buen ejemplo de sistema abierto: entrada y salida de vehículos, entrada de fuentes de energía como agua, electricidad, gas, etcétera, expulsión al cielo de gases industriales, etcétera. Desde sus inicios, el interés por el estudio de sistemas, desde la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy hasta los modernos desarrollos sobre sistemas alejados del equilibrio de Prigogine o la teoría de las catástrofes de Thom, ha sido un interés por el estudio de los sistemas abiertos.

En 1955 Bertalanffy describió dos características fundamentales de los sistemas abiertos. Primera, los sistemas abiertos, y a diferencia de los sistemas cerrados, pueden alcanzar un mismo estado final desde condiciones iniciales diferentes, y por diferentes caminos. Propiedad que recibiría el nombre de *equifinalidad* y que ya había sido propuesta por el propio Bertalanffy en 1940. Segunda, el mundo de lo vivo exhibe transiciones hacia un orden superior, heterogeneidad y organización. Bertalanffy lo denominó *ley de la evolución biológica*.

Figura 3.- Sistemas Abiertos:

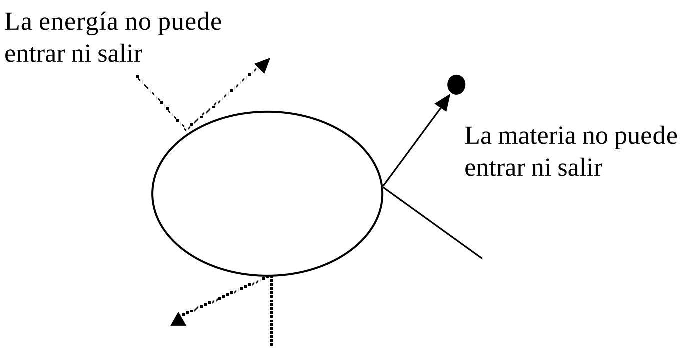




Dentro de los sistemas abiertos tendrían un lugar preferente los *sistemas vivos*, en lo cuáles además de intercambios de materia y energía con el medio, también se darían intercambios de información (Miller, 1965, 1978, 1992). Tanto materia como energía son dos magnitudes bien conocidas por la física. La información sólo ha sido desarrollada desde la matemática (*teoría de la información* de Shannon y Weaver).

Por último, en los *sistemas aislados* no ocurre ningún tipo de intercambio, ni de energía ni de materia, con el exterior. El Universo, considerado en su totalidad, es un ejemplo de ello.

Figura 4.- Sistema Aislado:



La diferenciación entre sistemas aislados, cerrados y abiertos, y el interés en la misma -en su diferenciación- es debido, en una gran medida, por el desarrollo de la Termodinámica, de sus principios como principios generales aplicables a cualquier realidad física, y del impacto de los mismos en un sinfín de disciplinas.

2.2.4.- Tipos de sistemas y segunda ley de la Termodinámica.

En 1850, el físico alemán Rudolf Clausius proponía los principios básicos de la Termodinámica. La Termodinámica, o ciencia del calor, se halla interesada por los procesos de transformación de energía. El *primer principio*, formulado por Clausius, establecía lo siguiente:

La energía del Universo permanece constante

Suele ser más conocida aquella otra formulación que declara que *la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma*. Ahora bien, como era patente de la experiencia real, en cualquier intercambio térmico se producen inevitables pérdidas de calor, en tanto a la posibilidad de utilización del mismo. En la naturaleza existe una disimetría: los cuerpos calientes se enfrían y no al revés. Es decir, aunque la energía sólo se transformase permaneciendo constante, era evidente que la forma en que la energía existe no era la misma tras el proceso de transformación, de tal forma que la energía dejaba de ser aprovechable. Cuando una máquina de vapor del siglo pasado consumía carbón mineral para su funcionamiento, era evidente que tras el uso del carbón la energía había cambiado de forma, de tal manera, que una vez utilizada para el movimiento de la máquina, ya no era aprovechable. El carbón había servido para propulsar la máquina, pero se había reducido a cenizas.

De otra forma, 'aunque la cantidad total de energía debe *conservarse* en cualquier proceso (...), la *distribución* de esta energía cambia de una forma *irreversible*' (Atkins, 1984, pág. 9). Es por ello, que Clausius formulase un *segundo principio*:

La entropía del Universo aumenta hasta su valor máximo

Con el término entropía (proveniente del griego y que significa transformación), Clausius recoge la *forma* en la que se encuentra la energía. La entropía es, por tanto, una medida de la pérdida del calor (energía) para fines útiles (Hayles, 1990), y cuya unidad de medida viene expresada en ratios de energía/temperatura (calorías/ºC). La entropía recogería el sentido natural del cambio en la distribución de la energía (Atkins, 1984).

Ambos principios fueron aunados en un gran enunciado cosmológico (Clausius, 1865):

Mientras la energía del Universo permanece constante,
la entropía del Universo aumenta hasta su valor máximo

(en su formulación original alemana:
Die energie der Welt ist konstant
Die entropie de Welt strebt einem maximun zu)

El impacto que produjo el segundo principio en la comunidad científica no se dejó esperar. Rápidamente se cayó en la cuenta que, si en todo intercambio térmico se producen pérdidas de energía para fines útiles, o aumentaba la entropía según la formulación de Clausius, llegaría un momento en el cuál ya no se dispondría de ninguna cantidad de energía utilizable. La entropía se hallaría, entonces, en su valor máximo, tal y como recoge la segunda ley. Se produciría una muerte térmica: en el Universo ya no habría energía que quemar.

A finales del siglo pasado, el físico inglés James Clerk Maxwell, reinterpretará la segunda ley de una manera *probabilista*. Para Maxwell (1860, 1890), la segunda ley era más bien una generalización estadística que una ley, con el sentido absoluto que ésta implica. Trabajando con las velocidades moleculares de un gas, propuso que nada impide que las moléculas del mismo se acumulen todas en una determinada zona del espacio. Ahora bien, tal hecho era muy improbable. De todas formas, ello suponía que el segundo principio no tenía la fuerza de una ley y confería a la entropía una significación estadística. Posteriormente, Ludwig Boltzman, físico austríaco, desarrollará esta reinterpretación de Maxwell. Boltzman (1909) amplía el concepto de entropía al considerarla como una medida de la aleatoriedad, o del desorden, en un sistema cerrado, proponiendo una formulación para su cálculo. En concreto, esta formulación era la siguiente:

$$S = k\,(\log W) \qquad (1)$$

donde S es la entropía,
k es una constante universal ($k = 3{,}2983 * 10^{-24}$), y
W es una magnitud relacionada con el desorden atómico y que mide hasta que punto la energía se halla dispersa

Tomemos un ejemplo comentado por Katherine Hayles (1990). Supongamos que arrojamos una moneda al aire cuatro veces. Supongamos, además, que hacemos un determinado número de tiradas, cada una de ellas con cuatro lanzamientos. Sólo uno de los resultados posibles coincide con la disposición de cuatro caras (C): CCCC. Por otra parte, hay seis maneras de obtener un resultado del tipo dos caras (C) y dos cruces (c):

CCcc CcCc CccC ccCC cCcC cCCc

Por lo tanto, según la fórmula de Boltzman, la cantidad W es mayor para el estado (o resultado final en nuestro ejemplo) dos caras y dos cruces que para el estado de cuatro caras, dado que hay un mayor número de maneras de llegar a dicho estado. En conclusión, '*mientras más mezclado o aleatorio sea el estado final, más probable será, porque habrá mas configuraciones que conduzcan a él*' (Hayles, 1990, pág. 63, la cursiva es nuestra) y, en consecuencia, será más entrópico.

Como la propia Hayles muestra, es posible reconciliar las interpretaciones de Boltzman y Clausius sobre la entropía. El calor es fundamentalmente una medida de energía interna. En el caso de los gases, esta energía correlaciona con la velocidad media de las moléculas que lo conforman. Mientras más caliente es el gas, más calor pierde cuando sufre intercambios térmicos, luego, más entrópico es (interpretación clásica de Clausius). Además, ocurre que también es mayor la velocidad de sus moléculas, luego más se mezclan éstas en el intercambio (interpretación probabilista de Boltzman).

La interpretación probabilista de la entropía tiene una ventaja sobre la interpretación basada en la pérdida del calor: permite extender el propio concepto de entropía a sistemas que nada tienen que ver con intercambios térmicos. Además de la ya mencionada lectura no determinista. Luego, y a modo de resumen, de todo lo dicho hasta aquí con respecto a la segunda ley (la seguiremos llamando así por tradición) podemos establecer la siguiente relación:

$$\textit{entropía} = \textit{desorden} = \textit{probabilidad} \qquad (2)$$

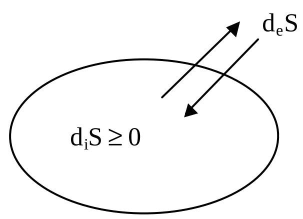
Nótese también que la formulación de Boltzman tiene la poco frecuente habilidad de relacionar dos mundos claramente diferenciados. De un lado, la entropía, S, perteneciente a la termodinámica clásica de los sucesos macroscópicos (pérdidas de calor). De otro, la magnitud W, perteneciente al mundo atómico, e indicador del desorden molecular (Atkins, 1984).

En su formulación original, la segunda ley está referida a los sistemas aislados (el Universo). En los sistemas aislados, la entropía tiende a su valor máximo, hacia estados de mayor desorden, de mayor probabilidad. Pero, ¿qué ocurre en otros tipos de sistemas? En 1945, Ilya Prigogine, químico de origen ruso pero residente en Bruselas y premio Nobel en 1977, formula una extensión de la segunda ley aplicable tanto a sistemas aislados, a sistemas cerrados, como a sistemas abiertos. Prigogine separará la *producción de entropía interna* del sistema, del *flujo de entropía* que el sistema pueda intercambiar con su entorno, aspecto éste, olvidado por la segunda ley ya que se había centrado en los sistemas aislados que, por definición, no mantienen ningún tipo de intercambio con el exterior.

Expresado mediante ecuaciones diferenciales sería como sigue:

$$dS = d_eS + d_iS \qquad (3)$$

donde dS representa los cambios de entropía a través del tiempo,
d_eS el flujo de entropía que se produce en todo intercambio con el medio, y
d_iS la producción de entropía que se produce en el interior del sistema debido a la irreversibilidad de los procesos que en él tienen lugar.



$$dS = d_eS + d_iS$$

Figura 5.- Dos términos del cambio de entropía producido a través del tiempo.

La formulación de Prigogine, permite una nueva lectura de la segunda ley. Nueva lectura en la que se puede diferenciar en función del tipo de sistemas. En efecto, para los sistemas aislados (en lo cuáles no hay flujo de entropía, d_eS, ya que son aislados), los cambios de entropía vendrían determinados exclusivamente por la producción de entropía (d_iS). Producción de entropía que siempre es positiva, según la segunda ley. De este modo, *para los sistemas aislados...*

$$\begin{aligned} dS &= d_eS + d_iS \\ dS &= d_iS \qquad\qquad \text{(ya que } d_eS = 0\text{)} \\ dS &= d_iS \ \$ \ 0 \qquad\qquad (4) \\ dS &\ \$ \ 0 \end{aligned}$$

Por tanto, para los sistemas aislados los cambios de entropía son siempre positivos. Luego, tiende siempre a crecer, tal y como ya había sido fijado por la formulación de Clausius.

Para los casos en los que el flujo de entropía no sea cero (d_eS *K 0*), es decir, en sistemas en los que se produce algún tipo de intercambio con el exterior (sistemas cerrados o abiertos), la formulación prigoginiana ofrece otras lecturas más interesantes. Veamos, de manera breve, qué ocurre en los sistemas cerrados, para centrarnos luego en los sistemas abiertos, que son el foco de nuestra atención.

Para los sistemas cerrados, la evolución marcada por la segunda ley viene determinada por una nueva magnitud: la energía libre. La energía libre es función de la energía, de la temperatura y de la entropía. Su formulación es como sigue:

$$F = E - TS \qquad (5)$$

Energía libre = Energía - Temperatura * Entropía

Para los casos en los que la temperatura es baja, la entropía también lo es, y el segundo término de la ecuación puede despreciarse. Es la situación característica de los estados sólidos. En los casos de temperaturas elevadas, la entropía también lo es. Es la situación característica del estado gaseoso. La temperatura se convierte, por tanto, en un parámetro de control, con valores críticos en los que se observan transiciones de fase. Por ejemplo, para el caso del agua, a 100 ºC ocurre la transición del estado líquido al gaseoso y, a 0 ºC, la transición del estado líquido al sólido.

Por fin, *para los sistemas abiertos* se precisa de un flujo de entropía con valor similar, pero de signo contrario, al valor de la producción de entropía. Es decir:

$$d_eS = -d_iS$$
$$d_eS = -d_iS < 0 \quad (\text{ya que } d_iS \geq 0) \qquad (6)$$

Ello es así en tanto que el sistema precisa de preservar un orden configuracional. Ahora bien, esto es así en principio, ya que la dinámica del entorno influirá en un aspecto clave: la posición de equilibrio del sistema. Aunque no entremos aquí ahora en detalles, dado que va a ser objeto de desarrollo en el capítulo próximo, baste apuntar lo siguiente. Para Prigogine (Glansdorff y Prigogine, 1971; Nicolis y Prigogine, 1977; Prigogine y Stengers, 1979; Prigogine, 1980; Prigogine, 1983) un sistema abierto puede existir en tres tipos de regímenes según su *posición de equilibrio*:

1. ..en equilibrio termodinámico, en el que flujos y corrientes han eliminado diferencias de temperatura o de concentración; la entropía ha alcanzado un nuevo y mayor valor, se ha alcanzado la uniformidad y el sistema deja de ser abierto para convertirse en un sistema cerrado. Un cristal es una típica estructura en equilibrio.

2. ..en un segundo régimen que difiere poco del estado de equilibrio, pero en él las pequeñas diferencias de temperatura o de concentración se mantienen dentro del sistema para que permanezca en un ligero desequilibrio. Si la perturbación del equilibrio es lo bastante pequeña, podemos analizar el sistema añadiendo únicamente una leve corrección al estado de equilibrio (estado lineal de no equilibrio).

3. ..y en un tercer régimen posible en el cuál la situación es muy distinta. Las ligaduras que el sistema mantiene con su entorno mantienen unos valores que obligan al sistema a alcanzar un estado lejos del equilibrio. En estas condiciones, pueden aparecer espontáneamente nuevas estructuras y tipos de organización que Prigogine denomina ‘estructuras disipativas’. Para la aparición de las estructuras disipativas se precisa también de la existencia de ciertos tipos de mecanismos de interacción no lineal que actúen entre los elementos del sistema. Para que la no linealidad pueda optar entre varias soluciones posibles, es necesario rebasar ciertas dimensiones espaciales críticas. Un ejemplo muy trabajado por Prigogine lo encontramos en la inestabilidad de Bénard, un tipo de reacción química en la que, en lugar de aparecer un estado de equilibrio homogéneo, bajo condiciones adecuadas, aparece una configuración regular en celdillas hexagonales.

Para finalizar con este punto, y haciendo resumen, tres son los aspectos que considero de mayor interés de la formulación de Prigogine y que debemos retener aquí y ahora. Primero, que en los sistemas aislados la producción de entropía siempre es positiva ($d_iS \ \$ \ 0$), luego la variación de entropía en estos sistemas también es positiva ($dS \ \$ \ 0$). *Los sistemas aislados tienden hacia estados de mayor entropía, de mayor desorden, de mayor probabilidad* (recogiendo ahora las aportaciones de Clausius y Boltzman).

Segundo, en los sistemas abiertos, el flujo de entropía siempre es negativo ($d_eS < 0$), a fin de contrarrestar la producción de entropía que siempre es positiva. Parafraseando a Erwin Schrödinger, físico austríaco, premio Nobel en 1933 y uno de los padres de la Mecánica Cuántica: "un sistema abierto se alimenta de entropía negativa". Y *mientras un sistema abierto sea capaz de seguir alimentándose de* esta *entropía negativa, tenderá hacia estados de menor entropía, de menor desorden y de mayor improbabilidad*. Con otras palabras: "la tendencia a la desorganización, a la entropía o probabilidad creciente que anuncia la Termodinámica, se refiere sólo a sistemas totalmente *aislados* de su entorno. Un sistema capaz de intercambiar algo con su entorno (..) tiene su oportunidad para buscar estados menos probables" (Wagensberg, 1986, pág. 145). De este modo, la noción de entropía de la termodinámica clásica y la noción de evolución de la biología darwiniana quedan reconciliadas (Laszlo, 1988; Jou y Llebot, 1989; Luhmann, 1995).

Y tercero, los sistemas abiertos pueden existir en tres tipos de regímenes en función de su distancia del equilibrio. Aparece con ello, un nuevo concepto, el de *equilibrio*, y junto con él otra clasificatoria de *sistemas*, *en-cerca-y alejados del equilibrio*, aspectos ambos que merecerán nuestra atención en próximos capítulos. Aquí, retengamos ahora que *en los sistemas alejados del equilibrio aparece de manera espontánea estructuras y tipos de organización*. Repitamos, de manera espontánea.

2.3.- Dinámica de Sistemas.

2.3.1.- Introducción a la Dinámica de Sistemas.

En los apartados precedentes hemos desarrollado los aspectos más relevantes de la Teoría General de Sistemas y de los principios de la Termodinámica como principios universales aplicables a cualquier tipo de sistema. Ahora vamos a introducir una nueva noción que, de una u otra manera, ha estado presente en la mayor parte del desarrollo anterior: la noción de *sistema dinámico*, en torno a la cual gira la disciplina denominada Dinámica de Sistemas.

Cuando al afrontar el estudio de un sistema una variable relevante es el factor tiempo, es decir, como evoluciona el sistema a lo largo de un determinado período de tiempo, prestaremos atención a los elementos dinámicos del sistema. Estaremos interesados en el estudio de la *dinámica del sistema*.

Esta dinámica es consecuencia, fundamentalmente, de las interacciones entre los elementos del sistema. Las interacciones entre los elementos están configurando, por otro lado, la estructura del sistema. Es por ello que, desde un punto de vista dinámico, todo sistema está siendo determinado por su estructura. Y, en este sentido, uno de los aspectos más destacados por la Dinámica de Sistemas es que las causas de los problemas que aparecen en un sistema social no son tan debidas a sucesos previos como a la propia estructura del sistema (Forrester, 1961, 1968; Aracil, 1983; Martínez y Requena, 1986; Senge, 1990).

Interesado por la dinámica de los sistemas, en especial los de tipo industrial, Jay W. Forrester, ingeniero del MIT, desarrollará toda una nueva disciplina con un marcado carácter tecnológico. Podríamos definir la Dinámica de Sistemas como una manera de estudiar el comportamiento de los sistemas, de tipo social, a fin de mostrar cómo las políticas, decisiones, estructuras y demoras en los flujos de retroalimentación se interrelacionan para influir en el desarrollo y en la estabilidad de los propios sistemas (Forrester, 1961). Más específicamente, podemos concebir la Dinámica de Sistemas como una metodología para la construcción de modelos de sistemas sociales (Aracil, 1983). Con ella se pretende el establecimiento de técnicas para formalizar, de forma matemática, los modelos que de manera verbal o mental se establecen sobre estos sistemas.

El origen de la Dinámica de Sistemas lo encontramos en una demanda de una compañía eléctrica para el estudio de las oscilaciones que presentaban sus pedidos (Forrester, 1961). En este estudio inicial, Forrester ya dio cuenta de la importancia de dos factores para el entendimiento de la dinámica de un sistema: el tipo de *bucles de realimentación* que tenían lugar en el mismo y las *demoras* o retrasos que se producían en estos propios bucles o rizos de realimentación. Trabajando con estos dos elementos, Forrester fue capaz de dar una respuesta satisfactoria al problema de las oscilaciones en los pedidos.

Desde sus inicios, Forrester ha ligado fuertemente la Dinámica de Sistemas a la gestión empresarial. Tal es así, que concebía la dinámica industrial -ese fue el nombre original que él le dio- como una disciplina que ayudaría a los gerentes en su toma de decisiones cotidiana. 'El gerente -dice Forrester- puede tener un laboratorio de diseño como ayuda para crear políticas de control perfeccionadas y flujos de información de los cuales ellas dependen. Esto conducirá hacia una mayor hondura en la educación gerencial y a cambios en las capacidades de los gerentes' (1961, pág. 43 de la edición en español). A partir de aquí, Forrester continuó trabajando en el modelado de diferentes sistemas, entre cuyos ejemplos más destacados sobresalen uno sobre dinámica urbana (1969) y un intento excesivamente globalizador sobre una dinámica del mundo (1971).

En la génesis y posterior desarrollo de la Dinámica de Sistemas contribuyeron disciplinas como la *teoría de los servomecanismos* y la *teoría general de sis-*

temas. La teoría de los servomecanismos se centra en el estudio sistemático del concepto de realimentación y del comportamiento dinámico de los sistemas La teoría de los servomecanismos es por ello un germen que posteriormente sería desarrollado bajo la denominación de *cibernética* por diferentes autores, en especial Norbert Wiener. A todo ello hay que añadir la fuerte evolución de los ordenadores a finales de los cincuenta, lo que permitía la fácil creación de simulaciones con modelos.

La utilización del ordenador en la simulación de los modelos creados es básica. El ordenador permite mostrar consecuencias dinámicas de las interrelaciones entre los componentes del sistema que escapan al procesamiento mental por su fuerte tendencia a pensar en relaciones causa-efecto lineales y cercanas en el tiempo y espacio (Aracil, 1983; Senge, 1990). La simulación en el ordenador nos permite penetrar en la complejidad de los sistemas sociales (Wagensberg, 1985). Permite trabajar con relaciones no lineales, un tipo de relaciones que no suelen encajar bien en nuestro modo habitual de pensamiento. La simulación en el ordenador, sustituye de este modo a la experimentación en laboratorio, experimentación que, por otra parte, es de difícil ejecución cuando nos interesamos por sistemas sociales. Por ello, '*la simulación puede jugar el papel de la experiencia frente a la teoría*' (Wagensberg, 1985, pág. 103, la cursiva es nuestra) en tanto que puede poner en entredicho a ésta y sugerir su revisión y, además, '*la simulación puede jugar el papel de la teoría frente a la experiencia*' (ob. cit., pág. 103, la cursiva es nuestra) en cuanto que puede describir, comprender y predecir fenómenos sin la necesidad de ponerlos a prueba.

Básicamente, y de manera muy esquemática, un estudio en dinámica de sistemas presenta las siguientes fases (Aracil, 1983):

1. Observación del comportamiento del sistema a fin de poder identificar los elementos fundamentales que lo componen y que son de interés para el estudio en concreto del mismo.

2. Determinación de las estructuras de realimentación que puedan producir el comportamiento observado.

3. A partir de la estructura identificada, se construye el modelo matemático de comportamiento del sistema de manera que pueda ser simulado en un ordenador.

4. Simulación del modelo.

5. La estructura planteada se modifica hasta que sus componentes y el comportamiento resultante coincidan con el comportamiento observado en el sistema real.

6. Simulación de decisiones en el ordenador: se modifican las decisiones que puedan ser introducidas en el modelo de simulación hasta encontrar

decisiones aceptables y utilizables que den lugar a un comportamiento real mejorado.

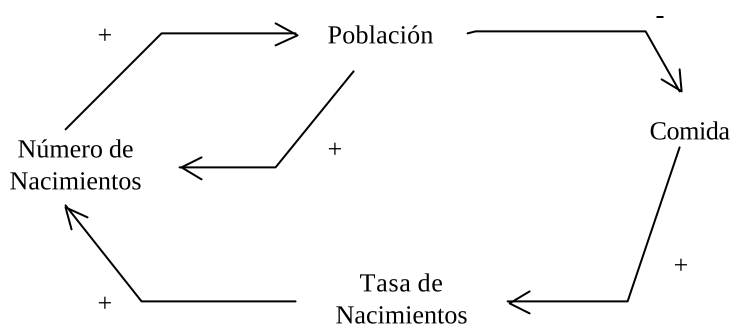


Figura 6: Ejemplo sencillo de un modelo de Dinámica de Sistemas. El ejemplo en concreto se refiere a la evolución de la población de una especie. Las flechas expresan relaciones de influencia, siendo las de signo positivo relaciones positivas (mientras mayor sea la tasa de nacimientos mayor será el número de éstos o, mientras menor sea la tasa de nacimientos menor será el número de nacimientos), y las de signo negativo relaciones negativas (a mayor población menor comida o, a menor población mayor comida).

Como podemos ver, la Dinámica de Sistemas conlleva el estudio detallado de las interrelaciones del sistema para su posterior modelado a fin de poder realizar simulaciones. Simulaciones que serán de una gran ayuda cara a la intervención posterior en el propio sistema. Simular antes de intervenir.

De este modo, la utilidad de la Dinámica de Sistemas en cuanto a la realización del modelado y posteriores simulaciones, son una inestimable ayuda para la toma de decisiones gerenciales, en ámbitos tanto privados como públicos, tal y como han puesto de manifiesto numerosos trabajos (Merten, 1988; Richardson y Rohrbaugh, 1990; Senge y Sterman, 1992; Aitchison y Kocay, 1994; Vennix, 1995; Lomi, Larse y Ginsberg, 1997). Y, además, también en este sentido ha habido autores que han sabido recoger una de las inquietudes iniciales de Forrester y han vinculado el modelado de sistemas y su simulación con la educación gerencial (Senge, 1990; Graham y Senge, 1990; Carena y Castelli, 1993; Sterman, 1994; Eftekhar, Strong y Hawalenskha, 1997). La Dinámica de Sistemas como una herramienta útil en el aprendizaje de un pensamiento sistémico, básico para la gestión de sistemas sociales.

Para los partidarios de este proceder, la utilización de simulaciones supone un método de toma de decisiones claramente superior a métodos basados en la simple acumulación de experiencias. Se demuestra que la experiencia constituye un aprendizaje muy primario y que no obtiene la información más relevante en el funcionamiento de los sistemas sociales (Senge, 1990; Senge y Sterman, 1992; Sterman, 1994; Kim y Senge, 1994; Lomi, Larsen y Ginsberg, 1997). Y ello debido básicamente a tres razones: primera, las relaciones entre elementos acostumbran a ser no lineales, lo cual hace más complejo el sistema social, segunda, la existencia de demoras o el alejamiento en el tiempo entre causas y efectos y, tercera, lo difícil que al pensamiento humano le resulta el entendimiento de los bucles de realimentación, más aún cuando hay presencia de varios bucles. En definitiva, se trata de limitaciones humanas en el procesamiento cognitivo de la información.

Siendo así, podríamos esperar un alta evidencia acerca de la mayor eficacia de la toma de decisiones guiada por la simulación de sistemas que la toma de decisiones no basada en ésta. En un estudio de Cavaleri y Sterman (1997), y el único que hemos encontrado a este respecto, trabajando con una serie de agencias de firmas de seguros en EE.UU. que comenzaron a aplicar la simulación basada en la Dinámica de Sistemas como ayuda para la toma de decisiones, hallan una evidencia media teniendo como variable criterio de éxito la productividad de las agencias. En unos casos, la productividad aumentó, en otros no sufrió ningún tipo de aumento. Cavaleri y Sterman acentúan la importancia de un correcto modelado de sistemas. El aspecto clave para que el modelado de sistemas sea de ayuda en la toma de decisiones está en la consideración de los aspectos importantes del fenómeno concreto y en la determinación correcta de las relaciones entre variables que constituyen dicho fenómeno.

2.3.2.- Elementos centrales en la Dinámica de Sistemas.

2.3.2.1.- Bucles de Realimentación.

Las personas tendemos a pensar en función de relaciones causa-efecto unidireccionales, olvidando otro tipo de relaciones más complejas tal y como nos han mostrado numerosos estudios y experimentaciones (e.g.- Hall, 1976, 1989; Kleinmuntz, 1985; Sterman, 1989a, 1989b; Brehmer, 1989). De ahí que el concepto de feed-back o realimentación de la cibernética haya supuesto una pequeña revolución que ha estremecido nuestra concepción más clásica de la causalidad. En esencia, el concepto de realimentación nos viene a remarcar que el separar causa de efecto es un mero artilugio analítico que, además, constriñe el pensamiento en tanto que obvia parte de la complejidad de la relación.

Un ejemplo. En un acto tan sencillo y cotidiano como llenar un vaso de agua, solemos expresarnos con palabras como "yo hago que el nivel del agua se eleve hasta donde deseo". En lenguaje de corte más causal: yo causo la elevación del nivel del agua (efecto). La cibernética viene a enfatizarnos que tal hecho es más complejo, algo parecido a lo siguiente: "mi propósito de llenar un vaso de agua crea un sistema que causa que el agua fluya cuando el nivel está bajo y luego cierre el grifo cuando el vaso está lleno" (Senge, 1990). Expresado en un diagrama sería tal y como aparece en la siguiente figura:

Vemos que nuestra descripción habitual causa-efecto, contempla la parte derecha del diagrama, desde "posición del grifo" hasta "nivel actual del agua". Descripción que, ahora comprobamos, es parcial.

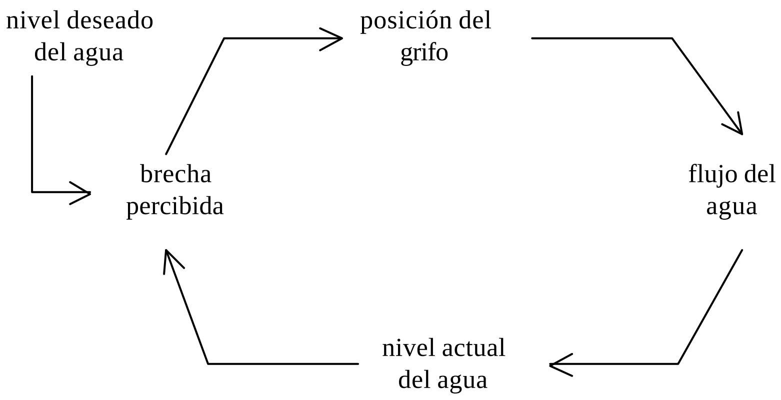


Figura 7: El acto de llenar un vaso de agua desde una visión cibernética, en la que se enfatiza la importancia del feed-back o realimentación. Las flechas expresan relaciones de influencia.

Centrados en la importancia de los bucles o rizos de realimentación, vamos a distinguir entre bucles de realimentación negativos y bucles de realimentación positivos, distinción clásica dentro de la Dinámica de Sistemas y la Cibernética (Forrester, 1961, 1968; Maruyama, 1963; Aracil, 1983; Martínez y Requena, 1986; Briggs y Peat, 1989; Senge, 1990).

Un ejemplo muy conocido de *bucle de realimentación negativo* lo encontramos en el termostato. Programamos la calefacción de nuestro salón para que la temperatura se mantenga a 18 ºC y el termostato que contiene este aparato hace que la estufa funcione más o menos intensamente para alcanzar este valor. Cuando la temperatura baja de los 18º el termostato enciende la estufa para que caliente el salón y, cuando la temperatura supera los 18º, el termostato apaga la estufa. La acción del termostato afecta la estufa, pero también la acción de la estufa afecta al termostato.

En términos dinámicos diríamos que un bucle o rizo de realimentación negativo hace que la variación en un elemento se transmite a lo largo del bucle de tal forma que determina una variación de signo contrario en ese mismo elemento, es decir, cualquier variación que se produzca en uno de los elementos del bucle tiende a anularse. De otra forma, *los bucles de realimentación negativos tienden a estabilizar al sistema*, a mantenerlo en un valor, serie de valores o un estado determinado. En una meta u objetivo. Por ello son mecanismos de realimentación compensadores, de contención de las desviaciones.

El interés por los bucles de realimentación negativos lo encontramos a mediados del siglo XIX en la *teoría de los servomecanismos*, germen de los que a mediados de los 40 Norbert Wiener bautizaría como *Cibernética*. Wiener trabajó en el perfeccionamiento de la artillería antiaérea, la cuál no acababa de funcionar debido a la velocidad que alcanzaban los aviones. Al pasar de disparar contra blancos fijos a blancos móviles, Wiener trabajo en la predicción del vuelo del móvil, por ello, era “de suma importancia disparar el misil, no contra el blanco, sino de modo que el misil y el blanco coincidan en un determinado momento futuro en el espacio” (1948, pág. 27). Con este objetivo, Wiener se valió de la información que proporcionaba la diferencia entre la predicción efectuada en cada momento y la posición real del blanco: “cuando deseamos que un movimiento siga un patrón determinado, la diferencia entre este patrón y el movimiento realmente efectuado se utiliza como nuevo impulso para que la parte regulada se mueva de tal modo que su movimiento se aproxime más al previsto por el patrón” (ob. cit., pág. 29).

Figura P. 3

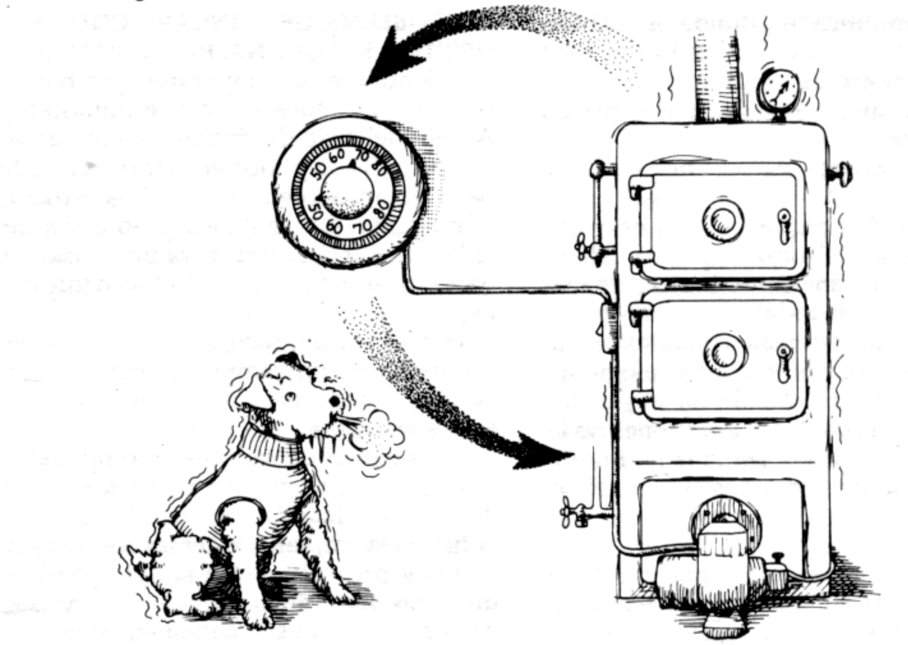


Figura 8: Ejemplo de bucle de realimentación negativo: relación entre el termostato y la estufa (imagen extraída de Briggs y Peat, 1989, pág. 25).

Vemos que esta cibernética más clásica presenta un marcado carácter teleológico, debido al carácter de los bucles de realimentación negativos. En el caso antes descrito, conseguir dar en el blanco.

Pero no todos los bucles de realimentación son negativos. También existen bucles de realimentación en los que, en lugar de amortiguar los efectos, éstos se amplifican y, que han servido a Maruyama (1963) para hablar de una *segunda cibernética*. Los *bucles de realimentación positivos* actúan de tal modo que la variación de un elemento inicial se propaga a lo largo del bucle reforzándola. El acople de un sonido nos sirve de ejemplo. La salida de audio que tiene lugar por el altavoz es captada por el micrófono que la vuelve a introducir, vuelve a salir el sonido amplificado que vuelve a entrar con mayor intensidad a través del micro, y en escasas décimas de segundo se produce el molesto sonido que nos es muy conocido. Los bucles de realimentación positivos representan un “efecto bola de nieve”, un círculo virtuoso.

Figura P. 4

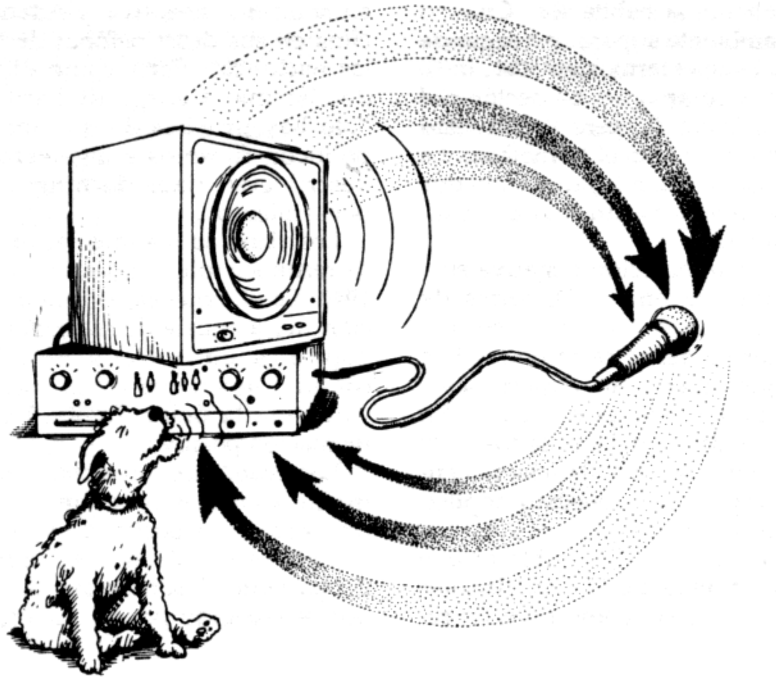


Figura 9: Ejemplo de bucle de realimentación positivo: acople de un sonido (imagen extraída de Briggs y Peat, 1989, pág. 26).

En términos dinámicos, un bucle o rizo de realimentación positiva representa la variación de un elemento que se propaga a lo largo del bucle y que refuerza la variación inicial haciéndola mayor. Por ello, *los bucles de realimentación positivos tienden a no mantener el equilibrio, al contrario, transportan al sistema hacia nuevos estados.* Son mecanismos de realimentación reforzadora, de amplificación de las desviaciones. De otro lado, los bucles de realimentación positiva suponen una nueva revisión del concepto de causalidad en tanto que no siempre causas similares producirán efectos similares debido a la posibilidad de amplificación de los efectos (Maruyama, 1963).

Lo más interesante, para la Dinámica de Sistemas, de los diferentes tipos de bucles de realimentación es su combinación en el modelado de sistemas. Así, sabremos que bucles de realimentación positivos amplían los efectos, mientras que los bucles de realimentación negativos los amortiguan o estabilizan. En el diagrama de la figura 6 representativo de la evolución de la población de una especie, la relación entre “población” y “número de nacimientos” genera un bucle de realimentación positiva, un bucle de amplificación. A mayor población, mayor número de nacimientos, y una nueva mayor población, y un mayor número de nacimientos, y así sucesivamente. Mientras que el bucle “población”, “comida”, “tasa de nacimientos” y “número de nacimientos” es un bucle de realimentación negativa ya que contiene una relación de carácter negativo entre población y comida.

De manera genérica, podemos establecer que cuando en un bucle hay un número par de relaciones de influencia negativas, dicho bucle es de carácter amplificador. Es un bucle de realimentación positiva. Por el contrario, cuando el número de relaciones de influencias negativas es impar, el bucle es de disminución de las amplificaciones. Es un bucle de realimentación negativa. Por otro lado, el carácter global del sistema, amplificador o estabilizador, tendente al desarrollo o a la estabilidad, dependerá de la fuerza (Maruyama, 1963) o dominación de uno sobre otros (Aracil, 1983) de los diferentes bucles de realimentación.

Weick (1969) ofrece una serie de guías, más detalladas, para determinar el carácter global del sistema. Así, la primera de ellas sería que el carácter del sistema viene determinado por el bucle que mayor número de elementos contiene. Si este bucle es reforzador, el sistema será de carácter de amplificación de las desviaciones; si éste es estabilizador, el sistema será de carácter de contención de las desviaciones. Si esta regla no es aplicable, por ejemplo, por igual número de elementos en bucles de distinto tipo, aplicaremos una segunda regla. El carácter del sistema vendrá dado por la predominancia de bucles positivos o negativos, es decir, por la predominancia, en número, de un tipo de bucles. Una tercera regla a aplicar en detrimento de las dos precedentes consiste en contar el número total de relaciones negativas entre todos los elementos del sistema, contando cada relación negativa cada vez que aparezca dentro de un bucle. Si este número total resulta impar, el sistema será de tipo estabilizador, que contrarresta las desviaciones, si el número es par, el sistema será de tipo reforzador, que amplifica las desviaciones. Aplicando estas guías al ejemplo de la figura 6, basta con tener en cuenta la primera de las reglas: el sistema es de carácter estabilizador en tanto al mayor número de elementos que implica el bucle negativo (cuatro en total) frente a los elementos implicados en el bucle positivo (dos).

2.3.2.2.- Demoras en los Flujos de Realimentación.

Junto al interés por los bucles de realimentación, bien positivos bien negativos, la Dinámica de Sistemas enfatiza la importancia de las demoras o retrasos en las transmisiones (de información, de material, etcétera). Es decir, al construir un modelo mediante diagramas causales, éste debe también tener en cuenta que la relación de influencia que une dos elementos puede precisar del transcurso de un cierto período de tiempo.

Por ejemplo, las decisiones de rebajar un producto no suelen tener un efecto inmediato en el número de ventas del mismo, sino que se requiere de un cierto período de tiempo para comprobar estos efectos. Otro ejemplo, entre la realización de un pedido a planta de fabricación y su recepción para su puesta a la venta suele transcurrir un tiempo. En este último caso, Forrester supo ver como las demoras producidas en los sistemas de distribución industriales provocaban oscilaciones en los pedidos (Forrester, 1961), de ahí que, desde un punto de vista gerencial, un mayor control de las demoras conduce a un mayor control en el sistema. Idea ésta que es nuclear en filosofías de distribución como la *just in time*.

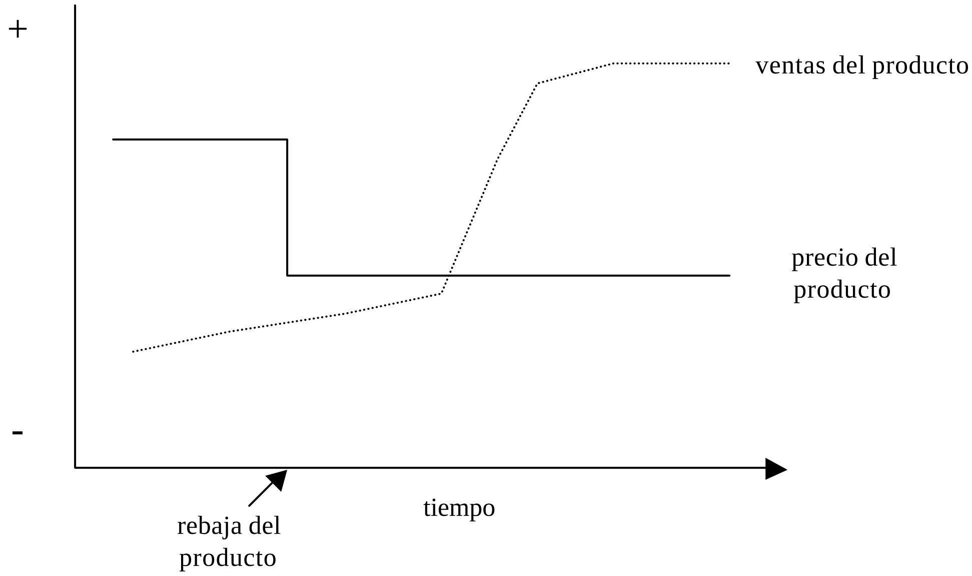


Figura 10: Un ejemplo de demora: la rebaja en el precio de un producto produce un mayor número de ventas de éste un cierto tiempo después.

Las demoras también nos sirven para explicar un fenómeno muy típico de los sistemas sociales: el alejamiento, en el tiempo y el espacio, entre causas y efectos (Aracil, 1983). Las decisiones que hoy toman nuestros políticos nos afectarán en un futuro, en unos casos más inmediato, en otros más lejano.

2.4.- Aplicación de la Teoría General de Sistemas y la Dinámica de Sistemas a la Teoría Organizativa.

Una vez repasados las principales ideas que, tanto la Teoría General de Sistemas como la Dinámica de Sistemas, han aportado al pensamiento científico actual, nos vamos a centrar en la Teoría Organizativa y en las principales aportaciones que aquéllas han realizado en este campo. Antes de ello, dejemos claro que vamos a entender por organización.

2.4.1.- El concepto de Organización.

De las organizaciones se ha dicho que es más fácil dar ejemplos que definir el término de manera precisa (March y Simon, 1977). Aun así, multitud son los autores que han propuesto su propia definición de lo que para ellos es una organización. Más que recoger algunas de estas definiciones que puedan ser representativas, nos interesa conceptualizar el fenómeno organizativo en sus características básicas.

En este sentido, el esfuerzo realizado por diferentes autores de sintetizar las características más relevantes de múltiples definiciones de lo que es una organización ha dado sus frutos. Así, cabe citar el trabajo de Porter, Lawler y Hackman (1975) en el que se recogen diez definiciones diferentes de otros tantos autores (Barnard, 1938; Etzioni, 1964; Scott, 1964; Thompson, 1967; Gross, 1968; Presthus, 1958; Simon, 1952; Schein, 1970; Litterer, 1965; Strother, 1963), y en nuestro país el trabajo de Quijano (1987, 1993) recogiendo las definiciones de dieciocho autores (Porter, Lawler y Hackman, 1975; Chapple, 1954; Leibestein, 1960; Weber, 1947; Barnard, 1938; Pfiffner y Sherwood, 1961; Simon, 1952; March y Simon, 1958; Mayntz, 1972; Etzioni, 1964; Scott, 1964; Friedmann, 1971; Weiss, 1956; Mateu, 1984; Katz y Khan, 1966; Mooney, 1947; Gerth y Mills, 1961; Argyris, 1957). Ambos trabajos, concluyen con un total de cinco características definitorias, como conjunto, del fenómeno organización a diferencia de lo que puedan ser otras instituciones y formaciones sociales. Estas características son las siguientes:

1. *Composición de la organización basada en individuos y/o grupos interrelacionados*;

2. *Orientación hacia unos objetivos o fines* que guían las actividades y procesos organizacionales, y que son perseguidos por la organización a fin de su propia subsistencia. Esta orientación teleológica de la organización conlleva, como ha señalado Quijano (1993), una serie de *implicaciones políticas* en tanto a la determinación de qué objetivos perseguir, el cómo perseguirlos así como su preservación. Igualmente, también representa unas *implicaciones para la gestión* por cuanto se ha de dirigir grupos de personas en la consecución de unos “intereses organizacionales”, para lo cual la organización deberá contar con el esfuerzo de sus miembros;

3. *Diferenciación de funciones* entre los miembros componentes de la organización. La diferenciación de funciones es una consecuencia de la persecución de unos intereses organizacionales para cuya consecución se precisa de una división de tareas y de funciones. A su vez, la diferenciación de funciones exige una ...

4. ... *Coordinación racional intencionada* necesaria para su integración en orden a la consecución de los fines organizacionales. La diferenciación y la correspondiente coordinación conllevan una serie de *implicaciones simbólicas* (Quijano, 1993) tales como el entrenamiento y socialización de los miembros de la organización en una serie de normas y valores, lo que conduce al entendimiento de la organización como una *entidad socialmente construida* (Weick, 1969, 1979); y

5. *Continuidad a través del tiempo* en tanto al mantenimiento de los patrones de interacción como sistema de roles, lo cual hace que la organización mantenga una cierta identidad como tal.

De una manera más gráfica, diríamos que la composición de la organización responde a la pregunta del *qué* es una organización, su orientación hacia fines u objetivos al *por qué* de la organización, la diferenciación de funciones y, a la vez, la coordinación racional al *cómo* del funcionamiento organizacional y, finalmente, su continuidad temporal al *cuándo* de la actuación de la organización.

Un sexto elemento definitorio, aunque en este caso no diferencial de otro tipo de instituciones, que no debemos de olvidar después de la obra de Katz y Kahn (1966) es la relación que la organización mantiene con el entorno en tanto sistema abierto que es.

2.4.2.- La Organización como Sistema.

Desde sus inicios, la Teoría General de Sistemas se ha hallado vinculada al fenómeno organizativo. Y es que, tanto en una como en otra, el centro de interés ha sido el de un sistema compuesto por una serie de variables interdependientes. Luego, el formalismo del concepto de sistema ha llevado a que '*la moderna teoría organizativa conduzca inevitablemente a una discusión de la teoría general de los sistemas*' (Scott, 1961, pág. 8, la cursiva es nuestra).

Partiendo de una perspectiva sistémica, podemos conceptualizar la organización como un sistema de partes interdependientes, centrando su atención en aquellas partes estratégicas o fundamentales para el sistema, en la naturaleza de la mutua interdependencia tanto entre sus partes, como en relación con el entorno, en los procesos que interrelacionan las partes y permiten la adaptación de unas con otras, y en los fines centrales del sistema como conjunto (Schein, 1980; Peiró, 1983).

Si tomamos en consideración algunos de los aspectos más destacados de la Teoría General de Sistemas, y de su derivado, el pensamiento de sistemas, que hemos detallado anteriormente, se nos dibuja una clara imagen acerca de la organización como sistema.

Primero, en la caracterización de lo que entenderemos por organización, ya hemos dejado claro que una primera característica definitoria del fenómeno organizativo era su composición de individuos y/o grupos interrelacionados. Recogiendo ahora la definición que hemos dado de sistema, deberíamos añadir que de estas interacciones entre individuos y/o grupos de la organización surge un comportamiento como un todo, como organización en conjunto. Como diría Peter Senge (1990), las organizaciones poseen integridad, y si dividimos una organización en dos partes iguales no obtenemos dos organizaciones pequeñas.

Aunque las fronteras que separan una organización de su entorno son borrosas (empleando el término borroso desde el prisma científico de la *Lógica Borrosa*; Zadeh, 1965), estaríamos de acuerdo en que organizaciones como El Corte Inglés, el BSCH, o Repsol, por citar algunas organizaciones conocidas por todos, tienen una *entidad propia*, y se diferencian del entorno que las envuelve o de otras organizaciones. Esta *entidad propia* es fruto del comportamiento como un todo de la organización, como un sistema.

Segundo, la organización puede ser considerada, a la vez, como sistema perteneciente a un suprasistema mayor, el sistema sociocultural de un país por ejemplo, y también como conformada por subsistemas. Así por ejemplo, Kast y Rosenzweig (1973) conciben la organización compuesta de un subsistema ambiental o del entorno el cuál a su vez incluiría: un subsistema técnico (documentos, técnicas, equipamientos, asistencias), un subsistema estructural (tareas, flujo de trabajo, jerarquía de autoridad, flujo de informaciones, etcétera), un subsistema psicosocial (recursos humanos, actitudes, percepciones, clima, etcétera), un subsistema de metas y valores (objetivos generales, específicos e individuales) y, un subsistema gerencial (objetivos, planificación, control, etcétera). Todos estos subsistemas están en mutua interacción, y configuran al gran sistema que es la organización, el cuál a su vez se halla en interacción con el medio. De manera similar, Katz y Khan (1966) consideraban los siguientes subsistemas organizacionales: subsistema técnico o de producción, subsistema de apoyo, subsistema de mantenimiento, subsistema de adaptación y subsistema gerencial. Por otro lado, la clásica diferenciación de niveles en el comportamiento organizativo de individuo-grupo-organización también constituye otro ejemplo más de esta caracterización de la organización como sistema.

Tercero, desde una visión sistémica, el interés por las organizaciones se centra en los problemas de relación, de estructura e interdependencia y no en sus atributos constantes (Katz y Khan, 1966; Schein, 1980; Peiró, 1983). Ello es congruente con la idea de una visión de la organización como un conjunto de roles (Katz y Khan, 1966), ya que éstos se basan en los procesos relacionales entre las partes de una organización (jerarquías, diferenciación por secciones, etcétera). Además, se enfatiza la fuerte interrelación entre los componentes del sistema, de tal forma que, cambios en una parte del sistema acaban afectando al sistema entero (un ejemplo de actualidad lo constituye la introducción de nuevas tecnologías en los puestos de trabajo). Llevando más allá este énfasis por los problemas de interdependencia, de relación y de estructura, toda intervención organizativa debiera centrarse más en los procesos que en los contenidos (como tanto ha insistido Schein, 1980, 1987, 1988), algo similar al interés por los procesos de grupo en una técnica como el *t-group*, más que en la temática que pueda desarrollarse en el mismo. Es lógico, por ello, que en la literatura actual haya un mayor interés por estudios del tipo estilos de liderazgo eficaces (proceso) que por estudios del tipo coeficiente de inteligencia de líderes transformacionales (contenido), buscando un ejemplo dentro del comportamiento organizativo

Cuarto, si concebimos la organización como sistema hemos de pensar en la aparición de propiedades emergentes. Cualquier proceso psicosocial de los que acontecen en las organizaciones, la cultura de empresa, los estilos de liderazgo, el clima, la participación, etcétera (Quijano y Navarro, 1999), pueden considerarse como emergentes organizacionales. De las interacciones de los miembros, emergen estos procesos psicosociales, que no son reducibles a las propiedades o elementos componentes y, además, acaban influyendo en los propios miembros. Parafraseando aquella conocida cita de Pinillos, los procesos psicosociales no lo son todo pero están en todo. Es más, la propia organización como tal puede ser vista, bajo este prisma, como un emergente.

La existencia de estos emergentes, y en quinto lugar, nos enfatiza la necesidad de una visión holística, sistémica, a la hora de abordar el estudio de cualquier fenómeno organizativo. Ackoff (1994) ha señalado la relevancia de un estudio de la organización desde una visión sintética, comenzado por la comprensión del sistema en su globalidad para continuar con el estudio de las partes del mismo, frente a un estudio analítico que procedería justo en sentido inverso (comenzar estudiando las partes para vía unión de los diferentes conocimientos pretender entender el sistema global). Antes que centrarnos en el estudio de un fenómeno de interés organizativo, por ejemplo, estilos de mando característicos, conviene contextualizarlo como componente de un sistema y, que recibirá influencias de, por ejemplo, el tipo de cultura imperante en la organización, los modelos de relaciones de autoridad que existen en el marco social, el tipo de autoridad que es seleccionada, formada y reforzada por los sistemas de gestión de Recursos Humanos (selección, formación, valoración de rendimientos y desempeños, etcétera), por citar algunas de las influencias que parecen más relevantes.

Y sexto y último, en toda organización, como sistema que es, hay puntos de influencia clave, partes estratégicas o centrales (Peiró, 1983). Ello es de vital importancia con vistas a la intervención, como ya dijimos. Por ejemplo, en la vasta literatura sobre participación en el trabajo, hay muchos ejemplos de intervenciones, experimentaciones incluso, acerca de cómo la mera participación de los empleados en los procesos de trabajo iba acompañada de una amplia serie de efectos en la conducta organizativa: mejora en la solución de problemas, mayor satisfacción, mayor autorrealización, menor alienación, mejora de las relaciones superiores-subordinados, mejor desempeño, menor absentismo, menor rotación, mejora de las actitudes ante el trabajo y, mejora de la producción (remitimos a Quintanilla, 1988, donde el autor hace un repaso histórico de algunas de las investigaciones más representativas en el ámbito de la participación).

Ello nos remite a algo a lo que prestaremos más atención en el próximo capítulo referido a que en los sistemas no lineales (una definición matemática de sistema no lineal es "aquél cuyo todo no es igual a la suma de sus partes", Kosko, 1993, pág. 279; luego una organización es un sistema no lineal, por todo lo dicho hasta aquí) pequeñas acciones pueden conseguir grandes efectos, lo que en climatología se conoce como el "efecto mariposa".

Tabla 2: La Organización desde un Enfoque Sistémico.

1.- Complejo de elementos interactuantes, y de cuyas interacciones surge un comportamiento como un todo.
2.- Sistemas, subsistemas, suprasistemas.
3.- Interés por los problemas de relación, de estructura, de interdependencia.
4.- Aparición de emergentes.
5.- Visión holística.
6.- Existencia de puntos clave de influencia.

2.4.3.- La Organización como Sistema Abierto y Social

Hasta aquí, hemos hablado de la organización como sistema, en general. Pero en la literatura organizativa ha sido más abundante la caracterización de la organización como un tipo concreto de sistema. En este sentido, sobresalen la perspectiva de los sistemas abiertos, de un lado, y la de los sistemas sociales, de otro, como las dos grandes caracterizaciones de la organización como sistema. Comencemos por la primera de ellas.

Desde mediados de los sesenta, las variadas conceptualizaciones del fenómeno organizativo tienen en cuenta esta visión de la organización como sistema (Quijano, 1993), como sistema abierto si precisamos. Para muestra, un botón. Mayntz en 1963 se refiere a las organizaciones como que '*están en una constante relación de intercambio con su medio social*' (pág. 59, la cursiva es nuestra), enfatizando el que a pesar de su continuo intercambio con el medio, las organizaciones conservan su identidad, aunque para ello necesiten adaptarse a las variaciones del medio ambiente. Comenta, 'esta propiedad, llamada también ultraestabilidad, utilizando esta expresión tomada de la cibernética, presupone la existencia de aptitudes para aprender y para renovar, de aptitud para la innovación' (pág. 60).

Pero no sólo es Mayntz. De hecho podemos considerar a los padres de la consideración de la organización como sistema abierto a los investigadores del *Tavistock Institute* de Londres. Parece ser que fue Fred Emery el introductor del concepto de sistema abierto dentro del citado instituto y '*el primer científico social que supo apreciar la significación de las ideas de Bertalanffy para la psicología y las ciencias sociales*' (Trist, entrevista con Weisbord, 1989, pág. 158). De manera breve, tanto Emery como Trist, Rice y otros investigadores del citado instituto, consideran a la organización como un sistema que importa información, materia prima, dinero, necesidades del cliente y exporta bienes, servicios e ideas por todo lo cual se reciben pagos. A la vez, para estos autores la organización es un sistema sociotécnico, social y técnico. Con ello se pretende integrar los requerimientos sociales de las personas en el trabajo, junto con los requerimientos tecnológicos exigidos por los flujos de trabajo. Ambos aspectos han ser considerados como interdependientes (recuérdese sus trabajos con la industria del carbón británica a finales de los 40 y durante los 50, y la influencia que tuvieron unos cambios en los sistemas de extracción del carbón en aspectos del sistema social como la producción, el absentismo, etcétera; Trist, 1950; Trist y Bamford, 1951). En definitiva, para la teoría sociotécnica '*a fin de sobrevivir y desarrollarse, los sistemas deben permanecer abiertos a, e interactuar constructivamente con, sus ambientes*' (Fox, 1995, pág. 92, la cursiva es nuestra).

También debemos citar el trabajo de Scott (1961) quién considera que el enfoque de los sistemas abiertos es el más óptimo para el entendimiento de la organización. Y seguramente hay otras referencias anteriores no conocidas por nosotros, pero de existencia muy probable dado el desarrollo que tuvo la Teoría General de

Sistemas durante la década de los años 50. Con todo ello, consideramos que es en 1966, con la primera edición de la obra de Katz y Khan '*Psicología Social de las Organizaciones*', cuando se asienta de manera definitiva esta concepción de la organización como sistema abierto. De este modo, afirmarán:

> 'Las organizaciones sociales son notoriamente sistemas abiertos, pues el insumo de energías y la conversión del resultado en insumo energético adicional consisten en transacciones entre la organización y su ambiente' (1966, pág. 25)

Podemos hacernos una idea más gráfica esta visión de las organizaciones de Katz y Khan como una entidad transformadora de inputs ambientales en outputs que también retornan al medio ambiente de la organización. La organización como generadora de un proceso adquisición de inputs-transformación-retorno de outputs al ambiente. Como un sistema *en constante intercambio con su entorno*, del que depende sobremanera.

La caracterización de la organización como sistema abierto viene, en parte, favorecida por las limitaciones con las que se ha encontrado una perspectiva de sistema cerrado. En especial, destacaríamos dos:

- Primera, la desconsideración del ambiente como fuente de recursos para la organización. Como dicen Katz y Khan (1966) '*el mayor error está en no reconocer totalmente que la organización depende continuamente de los insumos venidos del ambiente y que el influjo entrante de materiales y energía humana no es una constante*' (pág. 35, la cursiva es nuestra). Ello ha conllevado a una preocupación excesiva por el funcionamiento interno de la organización en la medida en que desde los sistemas cerrados sólo hay una vía para llegar a un resultado final (Bertalanffy, 1940). La organización desde la perspectiva de los sistemas cerrados es perfectamente planificable y explicable a partir de los elementos internos de la misma (la Organización Científica del Trabajo de Frederick Taylor sería un ejemplo paradigmático de esta visión con su búsqueda del *one best way*) y, como certeramente ha señalado Quijano (1993), esta concepción de la organización no permite, en la práctica, conseguir la 'racionalidad' que pretende.

- Y segunda, el tratamiento de las irregularidades surgidas en el funcionamiento del sistema debidas a las influencias ambientales como errores del sistema (Katz y Khan, 1966; Peiró, 1983) o, si se prefiere, como ruido, en terminología de teoría de la información (Shannon y Weaver, 1949), limitando con ello las posibilidades de aprendizaje para la organización.

Frente al tratamiento de la organización como sistema cerrado, Katz y Khan caracterizaron las organizaciones como sistemas abiertos sobre la base de la consideración de los siguientes aspectos:

- Importación de energía del ambiente externo, en forma de recursos materiales, tecnológicos, de capital humano, etcétera. Como dicen Katz y Khan (1966) 'ninguna estructura social es autosuficiente' (pág. 29).

- Transformación de la energía o reorganización del input. En el sistema se realiza algún tipo de trabajo.

- Exportación de algún resultado al exterior, tales como productos, servicios, etcétera.

- Los sistemas como ciclos de acontecimientos que se repiten: el producto exportado al ambiente proporciona la fuente de energía suficiente para la repetición del ciclo entrada-transformación-salida.

- Este ciclo, de entrada-transformación-salida, genera entropía negativa, lo que es de vital importancia para el mantenimiento del sistema. Si tomamos en cuenta la nomenclatura prigoginiana, el flujo de entropía (d_eS) es mayor que la producción de entropía (d_iS). "Las organizaciones sociales buscarán mejorar la posibilidad de supervivencia y lograr con sus reservas un cómodo margen de funcionamiento" (Katz y Khan, 1966, pág. 31).

  Más recientemente, Leifer (1989) ha aplicado la extensión prigoginiana a la segunda ley de una manera más específica. Para este autor, la cantidad total de recursos usados y requeridos por una organización son el resultado de los recursos utilizados en dos procesos: uno, interacciones con el entorno (tales como adquisiciones, ventas, reclutamientos, etcétera) y recursos utilizados en la producción de productos y/o servicios (manufactura, etcétera) y dos, las actividades de la organización referente a mantenimiento y soporte (gestión, I + D, publicidad, etcétera). Planteado así, para que una organización sobreviva, el término d_eS ha de ser mayor que el término d_iS, $d_eS > d_iS$, luego la entropía debida a los intercambios organización-ambiente ha de ser mayor que la entropía generada por las actividades organizacionales de mantenimiento y soporte. De este modo se consigue que la entropía venga determinada por el flujo de entropía con el medio, más que por la producción interna de la misma. Flujo de entropía que es positivo según (6). Así la organización consigue mantener una razón favorable de inputs/outputs, determinantes para su supervivencia y desarrollo (Wexley y Yukl, 1977).

- Los inputs del sistema no son sólo de carácter energético, también hay inputs informativos (Miller, 1955, 1965, 1978), que proporcionan señales acerca del ambiente así como de su propio funcionamiento en relación con éste, constituyendo un feedback negativo que conduce a la organización hacia estados estables.

- A pesar del continuo intercambio, la razón de intercambio de energía y las relaciones entre las partes permanece igual; es lo que se conoce como homeostasis (fenómeno muy estudiado en Biología y cuya ejemplificación paradigmática se halla en la regulación corporal de la temperatura). Ashby (1956) hablaba de las *variables esenciales* del sistema como aquellas que han de mantenerse dentro de ciertos límites a fin de garantizar la supervivencia del propio sistema (por ejemplo, el ya comentado caso de la temperatura, niveles de oxígeno, de glucosa en la sangre, etcétera). Esta homeostasis implica un equilibrio dinámico del sistema, un equilibrio cuasi-estacionario, como diría Kurt Lewin. Se trata, en definitiva, de conservar el carácter del sistema. Así, los sistemas abiertos tenderán a incorporar dentro de sus límites los recursos externos esenciales para su supervivencia.

- Los sistemas abiertos se mueven en la dirección de diferenciación y elaboración, las pautas globales difusas se reemplazan por funciones especializadas, es decir, hay una continua evolución hacia la mayor especialización dentro de la organización (Lawrence y Lorsch, 1969, 1973). Por ejemplo, una diferenciación básica en los sistemas abiertos es la distinción entre subsistemas de producción, encargados de transformar los inputs en outputs, y subsistemas de mantenimiento, encargados del sostenimiento del propio sistema.

- Como contrapartida al proceso de diferenciación, se necesita esfuerzos de integración y coordinación entre partes (Lawrence y Lorsch, 1969, 1973).

- Equifinalidad o propiedad de alcanzar un estado final por diferentes caminos o a partir de condiciones iniciales diferentes. El concepto de equifinalidad, ya propuesto por Bertalanffy en 1940, recoge una característica crítica para diferenciar entre los sistemas abiertos de los sistemas cerrados. Como decía Bertalanffy "*los procesos que acontecen en estructuras como de máquina siguen un camino fijo. Así, el estado final cambiará si se alteran las condiciones iniciales o el curso de los procesos. En contraste, puede alcanzarse el mismo estado final, la misma <meta>, partiendo de diferentes condiciones iniciales y siguiendo distintos itinerarios en los procesos organísmicos*' (pág. 136-137, la cursiva es nuestra).

No quisiera dar por finalizado este punto sin hacer unos añadidos a la caracterización de Katz y Khan. En primer lugar, los inputs informativos no sólo pueden constituir feedbacks negativos para la organización. Como ya hemos visto, la Dinámica de Sistemas (Forrester, 1961, 1968; Aracil, 1983) y la Cibernética (Wiener, 1948; Ashby, 1956; Maruyama, 1963) nos enseñan que, además de bucles de feedback negativos, que tienden a estabilizar el sistema, también existen bucles de feedback positivos, que tienen a no mantener el equilibrio, sino que transportan al sistema hacia nuevos estados.

Contamos con numerosos ejemplos, en el terreno organizativo, tanto de feedbacks negativos como positivos. Como ejemplos de los primeros, por ejemplo, los mecanismos de socialización tendentes al mantenimiento de las normas existentes, la puesta en marcha de políticas restrictivas en el gasto en periodos de declive, políticas retributivas de incentivación basadas en la consecución de objetivos, etcétera. Como ejemplos de los segundos tenemos, por ejemplo, todos lo que son fenómenos asociados a la propagación de rumores, las estrepitosas caídas bursátiles, el crecimiento desorbitado por el arrastre de un mercado emergente, etcétera.

Segundo, el concepto de homeostasis manejado por Katz y Khan es el clásico: capacidad de mantener al sistema en un estado estable. Pese a que incidan en que este equilibrio es dinámico ("Esto no significa inmovilidad o un verdadero equilibrio (..)", pág. 32), su concepción de la homeostasis es que el sistema tiende a mantener "el carácter del mismo, la proporción en los intercambios de energía y las relaciones entre partes" (pág. 32). Es decir, para ellos, y para otros tantos autores, el equilibrio dinámico consiste en ligeras modificaciones alrededor de un punto, de un valor, o de un estado, el cual constituye precisamente la posición de equilibrio (piénsese en lo paradigmático del valor de 37º C. en el caso de la regulación corporal de la temperatura). Recogiendo una idea de Goldstein (1988), los sistemas vivos -las organizaciones lo son- van más allá de este tipo sencillo de homeostasis, siendo la propia organización la variable fundamental que hay que mantener. Y claro está, una organización puede seguir manteniéndose como tal a pesar de que en ella se den profundos cambios (un ejemplo, los bancos o cajas de ahorros actuales no tienen demasiado que ver con los existentes a mediados de siglo). Volveremos sobre ello en capítulos posteriores.

De otra forma, y remitiendo a la *teoría matemática de los atractores* que trataremos en el próximo capítulo, esta concepción responde a fenómenos homeostáticos de un sistema cuya dinámica sea descrita por un atractor de punto fijo. Pero hay otros tipos de atractores diferentes a los de punto fijo. Hay atractores de ciclo límite, que describen dinámicas cíclicas, periódicas. Y también hay otro tipo de atractores, los atractores extraños o fractales, que describen dinámicas que no se repiten jamás.

Llevando la apreciación a un plano diferente, por todos es conocido el caso de significativos cambios organizacionales, incluso sociales. En los momentos de revolución o cambio, esta concepción clásica de homeostasis no tiene cabida. Sorokin en 1941 ya hablaba de que el concepto de equilibrio, entendiendo por éste el automantenimiento y regreso a un estado particular, es inconveniente para el análisis de cambios sociales. Y también Turner (1978) ha enfatizado lo inadecuado, por idénticas razones, del concepto de homeostasis. Se precisa de otras nociones. Nociones nuevas de homeostasis que habrán de ser mucho más dinámicas y, posiblemente, que remitan no a mantener el sistema alrededor de un punto, sino a mantenerlo alrededor de un amplio abanico de estados o puntos, los cuales a su vez, podrán dibujar determinadas trayectorias.

Finalmente, hay que hacer referencia a lo que en alguna literatura ha venido siendo considerado como un nuevo principio de la termodinámica (por ejemplo, puede verse una reciente edición a cargo de J. Wagensberg y J. Agustí, 1998, que, bajo el título '*El progreso. ¿Un concepto acabado o emergente?*', recoge una serie de conferencias sobre la idea de progreso y evolución de diferentes autores de reconocido prestigio como P. Alberch, B. Goodwin, D. Hull, R. Margalef, M. Ruse, M. McKinney además de los dos mencionados editores). Como ya hemos apuntado, los sistemas abiertos son capaces de escapar al devenir de la segunda ley gracias a su importación de entropía negativa. Katz y Khan han hablado de que el ciclo entrada-transformación-salida es generador de entropía negativa. Recientemente, ha habido autores que han enfatizado el papel del flujo de capital (*money flow*) como una medida de la entropía de los sistemas sociales (Swanson, Bailey y Miller, 1997).

Pero hay más. Los sistemas abiertos no sólo eluden la segunda ley, sino que, además, exhiben transiciones hacia estados de mayor complejidad y de mayor orden y estructuración (Laszlo, 1988; Waldrop, 1992), hecho que ya fue apuntado por Bertalanffy en su *ley de evolución biológica* (1955) a la que hicimos referencia más atrás. El nuevo principio termodinámico, no reconocido como tal por todos en la física actual, viene a decir que *en los sistemas abiertos hay una tendencia natural hacia los incrementos de complejidad*, entendiendo por complejidad autonomía con respecto al medio y capacidad de procesamiento de información. Entiéndase bien, *tendencia*, no una dirección inviolable. El ejemplo paradigmático de esta tendencia natural hacia estado más complejos lo constituye el aumento de complejidad orgánica acontecido a lo largo de la evolución biológica. Como atinadamente dice Jorge Wagensberg (1998), entre una bacteria y William Shakespeare algo ha pasado. Este nuevo principio termodinámico introduce un aspecto más relevante para la comprensión del cambio en las organizaciones y en otros sistemas sociales.

A modo de añadido a la consideración de las organizaciones como sistemas abiertos, podemos pensar en ellas como sistemas sociales (recuérdese el enfoque sociotécnico), o socioculturales si se prefiere. Un sistema social es un subtipo dentro de los sistemas abiertos, aunque con características propias y diferenciales. Entre éstas, destacaríamos (Katz y Khan, 1966; Aracil, 1983):

- Las organizaciones no presentan límites físicos o una estructura establecida como en el caso de los sistemas biológicos, en los que podemos encontrar piel, membranas, paredes celulares, etcétera. Floyd H. Allport (1962) aportó una visión de las estructuras sociales como configuradas por los ciclos de acontecimientos más que como partes físicas. En lugar de pensar en estructuras en función de un determinado número de departamentos (la típica figura de un organigrama), se puede pensar en la estructura como un flujo de acontecimientos (procesos de trabajo, flujos de producción, etcétera). Ello es útil si deseamos mantener una visión dinámica del sistema organización, además de enfatizar la importancia de no separar estructura del funcionamiento de la misma. Algo, por otra parte, inherente al concepto de sistema.

- Como cualquier otro sistema abierto, los sistemas sociales requieren de insumos de mantenimiento, además de los de producción. Los insumos de mantenimiento son importaciones energéticas que sostienen al sistema. Los de producción son las importaciones de energía que, al ser transformadas, devienen en resultados productivos del sistema. Pero en el caso de los sistemas sociales, estos insumos de mantenimiento están menos especificados y el problema del mantenimiento es más complejo. Por ejemplo, un organismo vivo requiere de mantener un determinado nivel de temperatura, un determinado nivel de reserva de grasas, de calorías, etcétera. Pero en el caso de los sistemas sociales, la situación es mucho más abierta. Por ejemplo, en la gestión de una organización, hay un amplio abanico de posibilidades de acción. Se puede gestionar de manera autoritaria (típico caso de un ejército), de manera controladora (burocracias), o con estilos más democráticos y participativos (utilización de técnicas como la dirección participativa por objetivos, por ejemplo). Y con cualquiera de los diferentes estilos de gestión, se pueden conseguir el propio sostenimiento del sistema. Remarquemos, la situación es mucho más abierta.

- Los sistemas sociales son sistemas inventados, ideados artificialmente, construidos por el hombre. De ahí que Simon (1973) haya hablado de las *ciencias de lo artificial*. Tan pronto pueden desaparecer, como subsistir a los hombres que las crearon.

- Los lazos que mantienen a las personas vinculadas a los sistemas sociales son más de carácter psicológico y social, que biológicos. Son necesidades como las de pertenencia, de autoestima, de desarrollo personal y profesional, entre otras, las que mantienen a las personas en las organizaciones. Ojo, además de otras como la de una retribución adecuada, de una seguridad relativa, etcétera.

- Los sistemas sociales presentan una mayor variabilidad que otros sistemas abiertos, como los biológicos. Por ejemplo, tienen un mayor gama de objetivos (abanico de productos y servicios muy amplio), pueden a su vez incorporar nuevos objetivos o modificar los existentes (los conocidos fenómenos de desplazamiento, sucesión e incorporación de objetivos) y, presentan un mayor número de mecanismos de control para mantener unido el sistema (todo el aparato burocrático tiene una lectura en clave de control del sistema).

- Un aspecto muy enfatizado por Katz y Khan es la concepción del sistema social como sistema de roles, como concepto que pauta las conductas de los miembros de la organización haciéndoles previsibles. Y con la particularidad que el sistema de roles trasciende a las personas que lo forman, haciéndose posible su continuidad al margen de la continuidad de los miembros. Echando mano del dicho, en los sistemas sociales nadie es imprescindible.

- En el interior de los sistemas sociales se generan fuerzas que determinan su evolución a lo largo del tiempo. De las interacciones entre los componentes del sistema surge el comportamiento dinámico del mismo. Un aspecto de vital importancia para comprender la evolución de los sistemas sociales es entender los bucles de realimentación que en él se presentan. Como ya sabemos, mecanismos de realimentación negativos tienden a estabilizar al sistema social, mientras que mecanismos de realimentación positivos tienden a amplificar los efectos y pueden transportar al sistema hacia nuevos estados (ya hemos dado ejemplos de ambos casos). Además, si los bucles de realimentación determinan el desarrollo del sistema social y, como ya hemos dicho más arriba, el funcionamiento del sistema configura su estructura, llegamos a que, las causas de los modos de funcionamiento de los sistemas sociales (sean éstos óptimos o problemáticos) no se encuentran tanto en sucesos previos, como en la estructura misma del sistema.

En este sentido, comienza a existir una fecunda literatura en el tratamiento del cambio de los sistemas sociales como *reorganizaciones* en las que se modifican los antiguos bucles de realimentación mediante el alejamiento del sistema de su condición de equilibrio actual (por ejemplo, Bigelow, 1982; Nonaka, 1988a; Leifer, 1989; Smith y Gemmill, 1991; Hallinan, 1997). En el capítulo cuarto daremos cuenta más detallada de estos trabajos al caracterizar a las organizaciones como sistemas caóticos.

- Los bucles de realimentación nos brindan, todavía, una sorpresa. Sucede, a veces, que un sistema social no modifica su comportamiento básico cuando se le somete a una determinada acción. Por el contrario, en otros casos, pequeñas acciones producen grandes efectos. El sistema es sensible a pequeñas desviaciones en el valor de un determinado, o determinados, parámetros. Como ya habíamos dicho, y recuperando la expresión, hay puntos en los que la palanca ejerce una mayor presión. Pero aquí, ahora, se viene a enfatizar el carácter catastrófico (esto no lo expresa así Aracil, autor del que extraemos la idea) de algunos valores (nuevamente, el término catastrófico es utilizado aquí en su acepción científica según la *Teoría de las Catástrofes* elaborada por Thom, 1977 y Zeeman, 1977). En el próximo capítulo desarrollaremos este aspecto, ahora baste decir que los puntos de catástrofes son los *puntos en concreto* en los que el sistema da un salto hacia un nuevo estado.

- Cabe hacer mención también de algo muy característico de los sistemas sociales y es el habitual conflicto entre políticas a largo plazo y políticas a corto plazo. Como bien señala Aracil (1983), ello condiciona en gran medida la toma de decisiones, en función de un interés temporal más inmediato o más lejano.

- Por fin, los sistemas sociales son *sistemas intencionales*. Un sistema social puede elegir, decidir sobre qué objetivos perseguir, sobre qué estrategias diseñar, sobre que principios, valores defender, sobre que estructura y diseño organizativo tener, y un largo etcétera. Y también tiene la posibilidad de modificar éstos en cualquier momento. Lo que no quiere decir que ello sea fácil. Los sistemas sociales tienen la propiedad de modificarse a sí mismos de una manera estructural fundamental (Buckley, 1967; Lawrence y Lorsch, 1969). Un sistema social también puede cuestionar los propios principios en los que se ha sustentado hasta ahora. La capacidad de aprendizaje, no se limita a una mera acumulación de experiencias que puedan cuestionar el comportamiento habitual de la organización, también se puede llegar a cuestionar las creencias y supuestos compartidos sobre los que ésta se cimienta (Argyris y Schön, 1978; Swieringa y Wierdsma, 1992).

Bien, demos por finalizado en este punto la caracterización de la organización como sistema. Como sistema abierto y social. A modo de resumen, y de recordatorio, recogemos a continuación algunas de las características que hemos ido comentado de la organización como sistema abierto y social, y que hemos considerado como más relevantes.

Tabla 3: La Organización como Sistema Abierto y Social.

01.- Conjunto de individuos y/o grupos interrelacionados, y de cuyas interacciones surge un comportamiento como un todo, como organización en conjunto. 02.- Sistemas, subsistemas, suprasistemas. 03.- Interés por los problemas de relación, de estructura, de interdependencia. 04.- Aparición de emergentes. 05.- Existencia de puntos clave de influencia. 06.- En constante intercambio con su entorno. 07.- Estructura basada en el funcionamiento. 08.- 'Alimentándose' de entropía negativa (capaces de escapar al devenir marcado por la segunda ley). 09.- Equifinalidad. 10.- Con mecanismos de retroalimentación (positivos y negativos). 11.- En complejidad creciente (mayor autonomía con respecto al medio). 12.- Sistemas inventados. 13.- Sistemas de roles. 14.- Sistemas intencionales.

3.- Teorías del Caos y Ciencia de la Complejidad. Nuevos desarrollos en la Teoría General de Sistemas

3.1.- Introducción.

> ‘En el principio creó Dios los cielos y la tierra. La tierra era caos y confusión y oscuridad por encima del abismo, y un viento de Dios aleteaba por encima de las aguas.
> Dijo Dios: «Haya luz», y hubo luz. Vio Dios que la luz estaba bien, y apartó Dios la luz de la oscuridad; y llamó Dios a la luz «día», y a la oscuridad la llamó «noche». Y atardeció y amaneció: día primero.’
> …
> Génesis, I. Orígenes del mundo y de la humanidad[5].

> ‘..la Ciencia es el esfuerzo colectivo del hombre para extraer un orden autorizado y de universal aceptación a partir del caos de la percepción sensorial, orden que viene continuamente evaluado por una observación minuciosa.’
>
> Thomas Leahey, *Historia de la psicología*, 1980, pág. 28.

Con precedentes como los anteriores, representativos del pensamiento occidental en lo religioso y en el quehacer científico, pretender hacer del caos un ‘objeto’ de interés científico bien pudiese parecer una tarea condenada al fracaso, cuando no un pequeño gesto de locura o, acaso, de manifiesta ingenuidad. Pero afortunadamente también hay referencias francamente alentadoras.

> ‘..en la Antigüedad, el caos no sólo fue visto como un desorden destructor de lo existente, sino que era la fuente generadora del orden. El Egipto faraónico hizo desempeñar este rol al padre de los dioses, Nut o Num; la mitología babilónica, a Apsu y Tiamat, que surgen de un magma primigenio; y algo parecido ocurre en el pensamiento chino, con el Yin y el Yang.’

> ‘..en la filosofía presocrática griega encontramos dos términos referidos a la cuestión: el término apeiron, empleado por Anaximandro, para designar lo indeterminado e infinito como origen de todas las cosas, y el término caos, con el que Anaxágoras se refería a la mezcla donde todas las cosas están en germen y que hace posible que el caos, como principio del orden, las haga realidad. En definitiva, en la visión que el pensamiento antiguo tuvo del caos,

[5] Biblia de Jerusalén. Bilbao: Desclée de Brouwer, 1992.

éste tampoco se confundía con el desorden sino que respondía a una idea muy diferente: la fuente y, por lo tanto, el germen y la condición del orden.'

Frederic Munné, *Complejidad y caos: más allá de una ideología del orden y el desorden*, 1994, pág. 16.

Desde la década de los setenta, son numerosas las disciplinas que se han interesado por el caos. Comenzó en la matemática y en la física, rápidamente traspasó a la química, y le siguieron la biología, la ecología, la geología. En los últimos tiempos, han sido disciplinas como la medicina, la economía y otras ciencias sociales, entre ellas la psicología, quienes han mostrado su interés en el estudio del caos.

En general, podemos distinguir dos enfoques ya clásicos en los estudios del caos (Hayles, 1990). El primero de ellos se centra en el orden oculto que existe dentro de los sistemas con dinámicas caóticas (sistemas caóticos). Estos sistemas contienen lo que se denominan *atractores extraños*, extraños patrones de orden que manifiestan un alta y rica organización allá donde parecía existir sólo aleatoriedad y reinar el azar. El foco de interés de este primer enfoque se halla en el propio caos y, no tanto en las estructuras organizadas que de él emergen. Se trata de una exploración de la ruta *del orden al caos*. Entre los máximos representantes de este enfoque encontramos a autores tan significativos en el estudio de los sistemas caóticos como Edward Lorenz, Mitchell Feigenbaum, Benoît Mandelbrot o los miembros del conocido Grupo de Santa Cruz, Robert Shaw, Norman Packard, Doyne Farmer y James Crutchfield. Todos estos autores están establecidos en Estados Unidos.

El segundo enfoque centra su atención en el surgimiento espontáneo de orden, de *autoorganización*, en las estructuras que surgen en condiciones de alejamiento del equilibrio de los sistemas, cuando la producción de entropía es elevada. Aquí se explora la otra posible ruta, la que conduce *del caos al orden*. Al contrario que en el enfoque anterior, en éste existe una figura central que monopoliza la cuestión como es Ilya Prigogine y, también a diferencia del anterior, tiene un desarrollo más europeo (Prigogine trabaja en Bruselas) con carácter también más filosófico. Aunque, todo sea dicho, el carácter más experimentalista del primer enfoque ha conseguido evidencias empíricas que han dado la razón, una vez y otra también, a las ideas de corte más intuitivo de Prigogine. Recientemente, autores americanos como Chris Langton y Stuart Kauffman, interesados por la vida artificial, se han aproximado también a este enfoque proponiendo que los fenómenos biológicos, caracterizados por sus propiedades organizativas, sólo son posibles en el borde del caos.

Ambos enfoques serán considerados aquí. El primero bajo el epígrafe que hemos denominado propiamente *Teorías del Caos*. El segundo dentro de dos apartados denominados *Vida en el borde del caos* y *Teoría de los Sistemas Alejados del Equilibrio*. Como se verá, aunque la terminología empleada por ambos enfoques no siempre sea coincidente, dichos enfoques están hablando de lo mismo. De sistemas con dinámicas caóticas; de sistemas en los que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales devienen en grandes diferencias en un estado posterior; sistemas con procesos no lineales; sistemas en los que conviven estabilidad e inestabilidad; sistemas alejados de la condición de equilibrio; sistemas, en debilidad; sistemas alejados de la condición de equilibrio; sistemas, en definitiva, complejos.

Parece por fin que, la *complejidad*, puede ser abordada de pleno derecho, y dejar de ser mero recurso lingüístico o conceptual con el que cubrir importantes lagunas en el conocimiento. En este sentido, las teorías del caos, así como antes hubieran hecho la teoría general de sistemas y la dinámica de sistemas, vienen a ofrecernos una serie de guías para la caracterización, no sólo teórica sino también operativa, de la complejidad. No vamos entrar aquí en más detalles dado que va a ser objeto de un amplio desarrollo posterior, baste ahora con apuntar que las diferentes teorías que iremos viendo a lo largo de este capítulo nos ofrecerán la posibilidad de un abordaje de la complejidad, en lo conceptual, en cuanto a caoticidad, fractalidad, catastrofismo y no-linealidad (Briggs y Peat, 1989; Lorenz, 1993; Munné, 1993, 1994a, 1995a) y, en lo operativo o metodológico, con relación a medidas concretas de complejidad como el exponente de Lyapunov, entropía de Kolmogorov y dimensión fractal, entre las más destacadas.

3.2.- Teorías del Caos.

3.2.1.- Introducción: el trabajo de Edward Lorenz y el nacimiento de una nueva disciplina.

Suele existir un cierto consenso en situar el nacimiento de los estudios del caos en un trabajo del meteorólogo perteneciente al Departamento de Meteorología del afamado MIT, Edward N. Lorenz, en 1963. Lorenz creó una pequeña simulación informática sobre el clima meteorológico basado en un conjunto de doce ecuaciones, con la que obtenía predicciones no lineales del tiempo climático. Para la meteorología, la aparición del ordenador abría una puerta a la esperanza de equiparar su disciplina con la astronomía, en la que se realizaban predicciones a años, siglos vista, con una simple regla, lápiz y papel. Se creía que las capacidades predictivas en meteorología llegarían a ser tan fuertes como en astronomía (Gleick, 1987), abundando en la inteligencia suprema que tiempo atrás había imaginado el matemático francés Pierre Simon de Laplace (ver cuadro 1). Era cuestión de tiempo a fin de que, tecnológicamente, se desarrollaran aparatos de medición perfectos y tecnologías adecuadas para el procesamiento de los mismos. Sólo se precisaba de ordenadores que fueran capaces de procesar miles de variables a un mismo tiempo y las puertas de una predicción meteorológica tan exacta como en astronomía quedarían abiertas. Detrás vendría el control del hombre sobre el clima, y la lluvia y el sol aparecerían a su merced.

El sistema de ecuaciones de Lorenz tenía una peculiaridad de sumo interés para el modelado en climatología: producía comportamientos no periódicos gracias a la no linealidad de las ecuaciones. En el clima, jamás se dan dos situaciones exactamente iguales -es irreal pensar siquiera en dos situaciones climatológicas con la misma temperatura, iguales niveles de humedad, idéntica velocidad de vientos y dirección de éstos, misma posición de las nubes, etcétera-. Narra Lorenz (1993, págs. 136-139) cómo trabajando con esta simulación, en un momento dado decidió repetir algunos de los cálculos para lo cual paró la predicción e introdujo en el programa simulador una secuencia que había salido impresa un poco antes. Volvió a poner en marcha la simulación y pudo comprobar como los números resultantes no tenían nada que ver con los que anteriormente habían salido. La sorpresa fue mayúscula. El programa simulador no había sido cambiado en ningún momento, se habían introducido los mismos valores para operar, pero los resultados eran distintos.

Cuadro 1: Manifiesto de Laplace sobre el determinismo. La inteligencia a la que se refiere será conocida desde entonces como "*el demonio de Laplace*".

> "Una inteligencia que conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, ... podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes a sus ojos."
>
> P. S. Laplace, 1814, *Essai philosophique sur les probabilités*; recogido por Fernández-Rañada, 1990, pág. 5.

Observando los nuevos valores, Lorenz comprobó que éstos repetían los anteriores en un primer momento pero enseguida empezaban a diferir de tal forma que las diferencias se duplicaban cada cuatro días de predicción y, al cabo de dos meses, ambas soluciones eran completamente distintas. Lorenz cayó en la cuenta que los valores que él había introducido para el nuevo cálculo eran los valores redondeados que le había facilitado la salida impresa. En la impresión, y por motivos de espacio, sólo aparecían tres de los seis decimales originales, con lo cual, dedujo que los errores redondeados iniciales se había amplificando hasta dominar la solución.

El mayor acierto de Lorenz estuvo en advertir que, si la atmósfera real se comportaba como el sencillo modelo simulado, la predicción a largo plazo se hacía imposible. Las diferentes variables que son tomadas en consideración para el establecimiento de las predicciones meteorológicas (temperaturas, velocidad de vientos, etcétera) no son medidas con precisión de tres decimales y, aunque pudieran medirse, la corroboración de medidas entre diferentes observatorios no presentaría dicha precisión. Todo lo cual conducía a la imposibilidad de prever el clima a largo plazo, según el modelo trabajado por Lorenz. De otra forma, Lorenz comprendió el vínculo existente entre la falta de periodicidad de un sistema y su impredecibilidad (declaración realizada en una entrevista con J. Gleick, 1987, pág. 26).

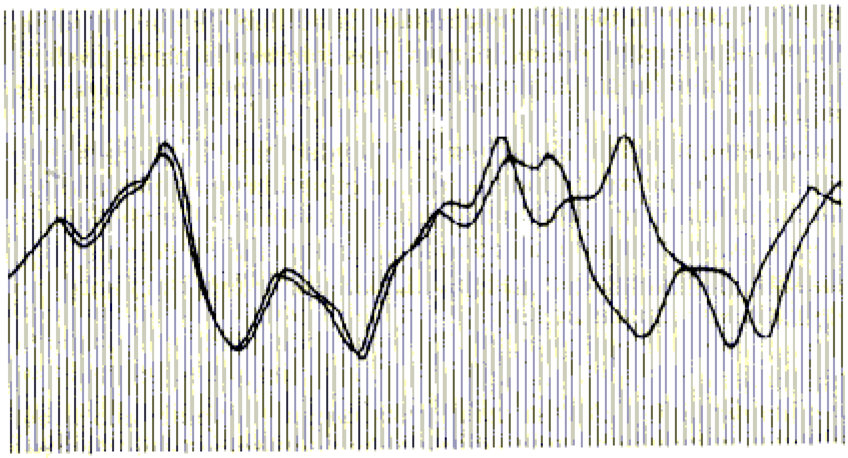


Figura 11: Divergencia de dos pautas de tiempo atmosférico. A dos condiciones iniciales muy parecidas se les aplica el mismo programa generador, pero con el tiempo, las predicciones de ambas comienza a diferenciarse más y más. De otra forma, un input aproximado no rinde un output aproximado (extraído de Gleick, 1989, pág. 25).

El conjunto de ecuaciones de Lorenz dan lugar al atractor de Lorenz, también conocido como "mariposa de Lorenz", u órbita de los diferentes estados por los que pasa el sistema en la simulación (ver figura 12).

Dicha figura presenta la propiedad de que sus órbitas nunca se tocan, dado que el sistema no es periódico, con lo que las superficies descritas son infinitas en número. Y, además, permanecen siempre dentro de un espacio confinado. La paradoja es evidente: superficies infinitas dentro de un espacio finito. Se trata, como veremos más adelante, de un *atractor extraño*.

La sensibilidad a las condiciones iniciales mostrado por las ecuaciones de Lorenz será conocida desde entonces como el *efecto mariposa*. Ello en parte debido a una comunicación suya de 1972 titulada "¿El aleteo de una mariposa en Brasil ha ocasionado un tornado en Texas?" (Lorenz, 1972), en parte debido a la apariencia de unas alas de mariposa del atractor descrito por dicho sistema de ecuaciones (ver figura 12).

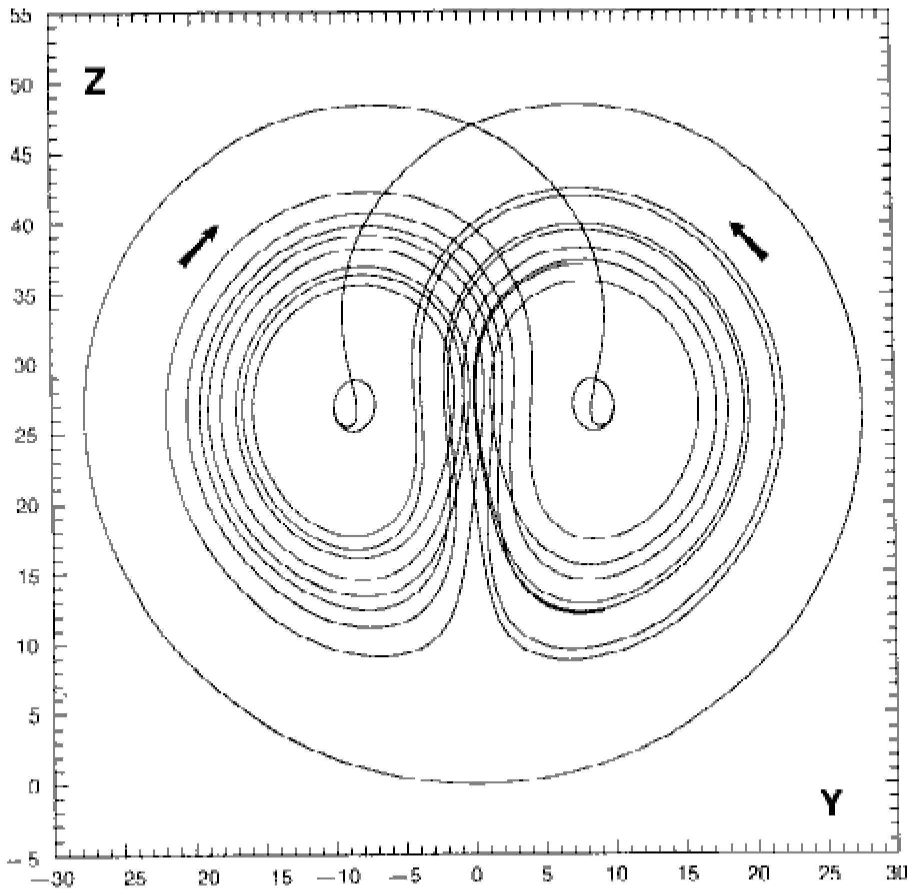


Figura 12: Esbozo del atractor de Lorenz. La simulación informática describe una órbita que alterna entre circuitos en el sentido de las agujas del reloj en torno al agujero izquierdo, y circuitos en sentido contrario a las agujas del reloj en torno al agujero derecho (figura tomada de Lorenz, 1993, pág. 144). El propio Lorenz construiría después un artilugio mecánico consistente en una noria -noria de Lorenz- que describe dichos movimientos y que suele ser habitual encontrar en los Museos de Ciencia.

En cualquier caso, la fragilidad de las alas de una mariposa se ha mostrado cómo una excelente metáfora para simbolizar cómo lo pequeño puede originar lo grande (Lorenz, 1993). El error de una milésima en el sistema de ecuaciones de Lorenz, da lugar, al cabo de pocas iteraciones del modelo, a comportamientos muy distintos en el sistema modelado. De otra forma, que dos situaciones iniciales climatológicas prácticamente similares, y que sólo difieran en el aleteo de una delicada mariposa, pueden evolucionar, al cabo del tiempo, de modos tan distintos que se diferencien entre sí en algo tan grande como un tornado. Esta es la esencia del *efecto mariposa*: la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales. Y esta es una característica definitoria de los sistemas caóticos desde entonces: la existencia del efecto mariposa o sensibilidad a las condiciones iniciales, fenómeno que ya fue intuido por el gran matemático francés de finales del siglo XIX Henri Poincaré (ver cuadro 2).

Cuadro 2: Declaración de H. Poincaré en la que queda reflejada la esencia del caos. Haría falta casi un siglo para que la ciencia afrontase su estudio.

> ‘Si conociésemos exactamente las leyes de la naturaleza y la situación del Universo en el momento inicial, podríamos predecir exactamente la situación de ese mismo Universo en un momento posterior. Pero, aun cuando se diese el caso de que las leyes de la naturaleza no tuvieran ningún secreto para nosotros, incluso así sólo podríamos conocer la situación inicial aproximadamente. Si esto nos permitiese predecir la situación siguiente con la misma aproximación, eso es todo lo que necesitamos y diríamos que el fenómeno habríase predicho, que está gobernado por leyes. Pero no siempre es así; puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales las produzcan grandes en el fenómeno final. (..) La predicción se hace imposible y aparece el fenómeno fortuito.’
>
> Henri Poincaré, *Science et Méthode*, 1908; recogido por Crutchfield et al., 1987, pág. 80.

Si a la sensibilidad a las condiciones iniciales añadimos la imposibilidad del conocimiento exacto de las propias condiciones iniciales (*principio de incertidumbre* de Heisenberg) tenemos como consecuencia la impredecibilidad del sistema a un largo plazo. Con todo lo cual contamos con que, *un sistema de ecuaciones completamente determinista*, como por ejemplo el utilizado por Lorenz, *nos ha conducido a la imposibilidad de prever los resultados que produce dicho sistema en un largo plazo*. Determinismo y predecibilidad han dejado de ir de la mano (Crutchfield, et al., 1987; Hénon, 1989; Haken y Wunderlin, 1990; Ruelle, 1991; Eckmann y Mashaal, 1991; Solé, 1995; Jou, 1995). Volveremos sobre ello al caracterizar a los sistemas caóticos.

Comenta el propio Lorenz a modo de conclusión de su trabajo de 1963 que, quizás, la idea más importante por él transmitida entonces fue ‘que el caos era algo que había que buscar en lugar de algo que había que eludir’ (1993, pág. 149). Con el transcurrir de los años se comprobaría que lo encontrado por Lorenz no se trataba de un fenómeno subsidiario o acaso singular. Al contrario, poco a poco, las investigaciones provenientes de múltiples campos disciplinarios van a ir poniendo de manifiesto la frecuencia de fenómenos con dinámicas caóticas.

3.2.2.- Aportaciones desde la Topología: la Teoría de los Atractores.

La topología, también conocida como la geometría del espacio elástico o geometría ‘de la tira de goma’, se halla interesada en el estudio de las propiedades de las figuras geométricas que no varían una vez que el espacio cambia y se desfigura por movimientos de estiramiento, comprensión y torsión (Stewart, 1989). Se halla interesada en el estudio de la continuidad en las formas, centrándose en aspectos como la posición relativa y la forma en general, a diferencia de la geometría más preocupada por propiedades como la posición o distancia absoluta y por las rectas paralelas. De una manera menos formal, podríamos decir también que la topología centra su estudio en el análisis de las formas que van adquiriendo los sistemas dinámicos.

Para la realización de dichos análisis de formas, los matemáticos suelen trabajar con lo que ellos llaman *espacio de fases*, una especie de diagrama en el que queda representado el movimiento del sistema. Con los espacios de fases se consigue graficar el movimiento de un sistema de forma geométrica. Por ejemplo, representemos en un espacio de fases de dos dimensiones el movimiento de un péndulo. Como dimensiones tomemos la posición y el impulso.

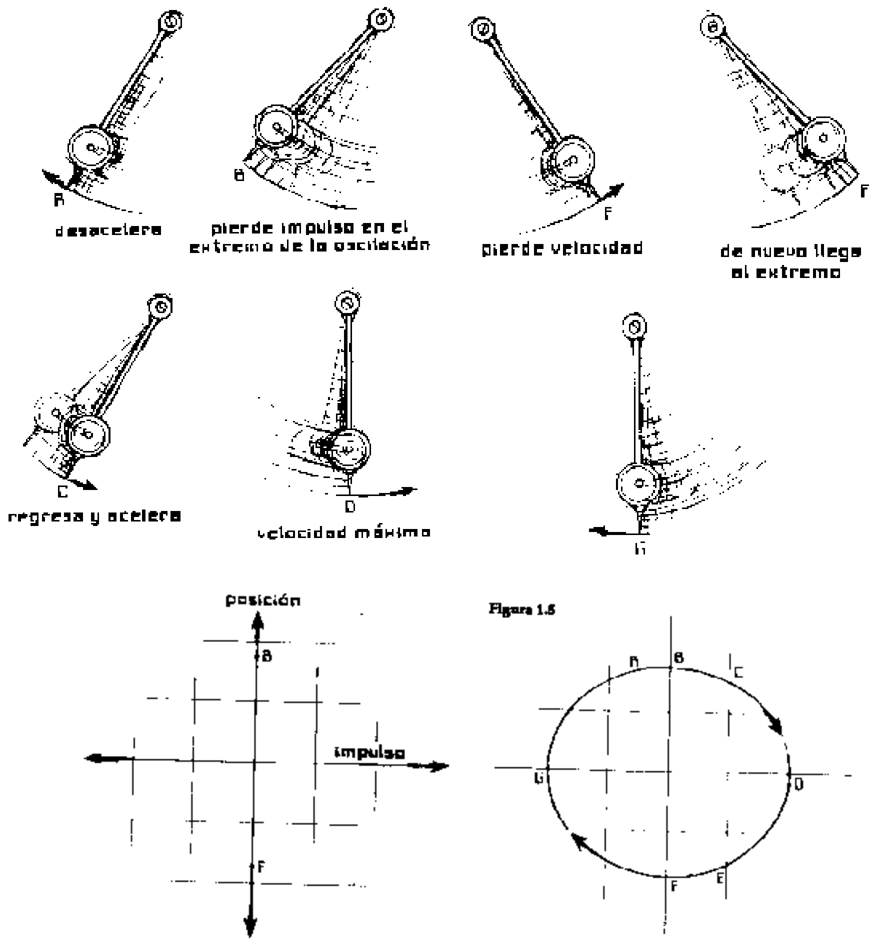


Figura 13. Representación en un espacio de fases del movimiento de un péndulo (extraído de Briggs y Peat, 1989, págs. 34-35).

El espacio de fases dibuja una trayectoria circular que se repite una y otra vez, al igual que el movimiento pendular (de un péndulo con mecanismo de propulsión, como, por ejemplo, el de un reloj de pared). Es por ello que, el espacio de fases se constituya en una buena herramienta para poner de manifiesto la dinámica del sistema y las formas en ella implícitas. En nuestro caso, para caracterizar al sistema péndulo como un sistema con un comportamiento periódico.

Poincaré identificó cuatro formas típicas que pueden presentarse en el espacio de fases. Los *sumideros* o puntos concretos hacia los que confluyen todos los puntos vecinos. Las *fuentes* o puntos concretos que actúa como de repulsor de los puntos vecinos: éstos se alejan más y más de él. Las *sillas de montar* o puntos que actúan a la vez de sumidero y de fuente dependiendo de la dirección que se tome en cuenta: en una dirección horizontal, por ejemplo, actúan como puntos de atracción, esto es, como sumideros, de los puntos vecinos, mientras que en dirección vertical, actúan al mismo tiempo como fuente. Y los *ciclos límite* o conjunto de puntos en el espacio de fases que, formando un círculo, atraen una y otra vez al resto de los puntos, como en el caso del péndulo apuntado antes.

De las cuatro formas típicas en el plano descritas por Poincaré y Bendixson, el *sumidero* y el *ciclo límite* tienen la propiedad de ser estructuralmente estables. Por otro lado, se trata de auténticos puntos o zonas de atracción para el resto de los puntos del espacio de fases. Son *atractores*.

El concepto de atractor es de utilidad para designar aquellos puntos o estados que atraen al resto de los puntos del espacio de fases hacia sí (Stewart, 1989; Ruelle, 1989) o, de otra forma, aquellos puntos o estados que atraen a un sistema dinámico hacia sí (e.g. Crutchfield, et al., 1987; Eckmann y Mashaal, 1991). Si esperamos el suficiente tiempo, el sistema dinámico acabará estabilizándose en una determinada región o en un determinado punto, del espacio de fases. Al igual que hay atractores en los sistemas dinámicos también hay repulsores, puntos o estados que repelen al sistema (las fuentes y sillas de montar en una de las direcciones), algo similar a valles y montañas de un relieve en el que dejamos caer un objeto: es probable que el objeto acabe en uno de los valles (atractor) y no que se quede atrapado en uno de los picos montañosos (repulsor). Naturalmente un sistema dinámico puede tener varios atractores y repulsores que actúan de manera simultánea.

El interés por los atractores en los sistemas dinámicos lo encontramos en el propio Poincaré al observar cómo las órbitas de los sistemas dinámicos no lineales podían ser atraídas por conjuntos extraños (recogido por Mandelbrot, 1977). Igualmente, Poincaré observó que estos sistemas dinámicos también presentaban repulsores, o conjunto de estados en los que el equilibrio era inestable y, por ello, no atraían al sistema dinámico hacia sí, al contrario, lo repelían. Poincaré operaba para ello con cortes transversales al flujo de trayectorias del sistema dinámico (e.g. Chabert y Dalmedico, 1991). Estas secciones, conocidas hoy como *secciones de Poincaré*, le proporcionaba una información muy valiosa sobre la naturaleza del sistema. Así, si la dinámica obedece a una dinámica determinista, la sección de Poincaré obtiene una imagen bien definida, reflejo de esta determinación. En cambio, en dinámicas totalmente aleatorias, la sección de Poincaré obtiene una nube desordenada de puntos que ocupa toda la sección.

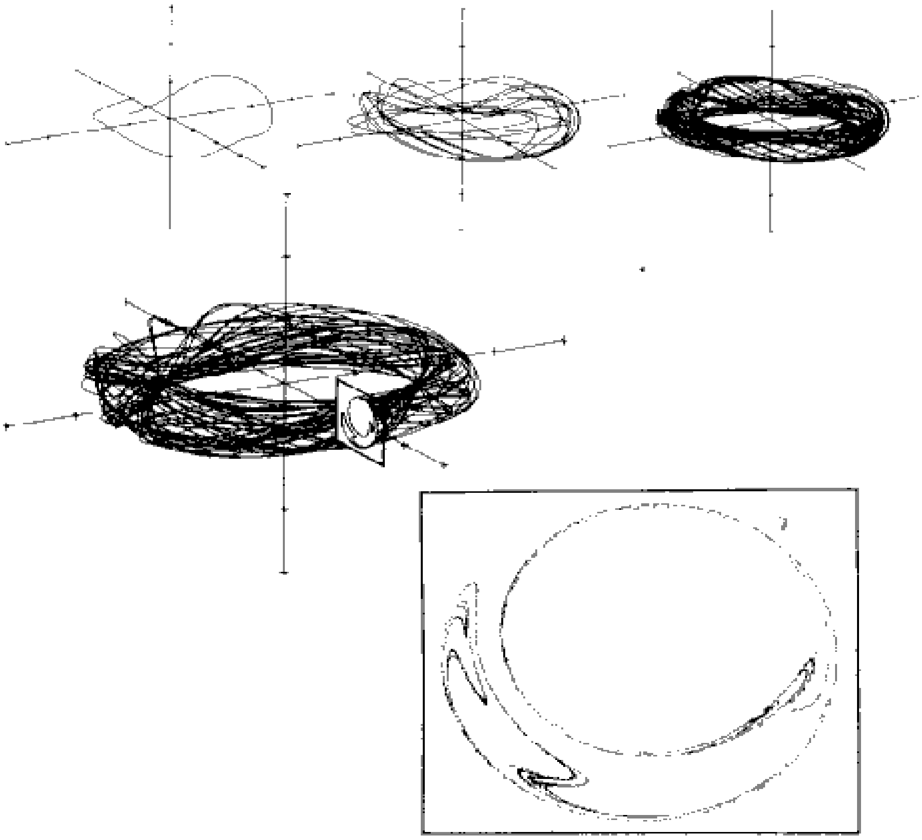


Figura 14: Ejemplo de obtención de una sección de Poincaré sobre un haz de trayectorias pertenecientes a una dinámica determinista (imagen extraída de Gleick, 1987, pág. 151).

3.2.2.1.- Mapas de retardo.

Un tipo específico de espacio de fase lo constituyen los denominados *mapas de retardo*, herramientas de uso común en el estudio de los sistemas caóticos. Un mapa de retardo es un espacio de fases en el que las dimensiones tomadas como referencia para graficar el comportamiento dinámico de un sistema son dimensiones temporales t, t+1, t+2, t+n, etcétera (Packard, et al., 1980; Crutchfield, et al., 1987). En este esquema, se representa alguna de las variables de interés que comprenda la dinámica del sistema.

De otra forma, esta técnica va siguiendo el rastro de los valores de las variables que van cambiando con el transcurso del tiempo. El tipo y número de variables depende de cada sistema, así en muchos sistemas complejos resulta difícil medir, o siquiera identificar, la totalidad de variables de interés que conforman el sistema. En estos casos, adquiere un mayor interés la técnica de mapas de retardo ya que sólo precisamos del conocimiento de una serie temporal de alguna de las variables que forman parte del sistema. En el caso del mapa de retardo más sencillo, cada punto de la gráfica corresponde al valor de una de las variables del sistema en un instante dado, expresado en función del valor que toma esa misma variable tras un período de retardo. Con una serie de tales puntos, correspondientes a los instantes sucesivos, se dibuja una curva o trayectoria que describe la evolución del sistema (Goldberger, Rigney y West, 1990). Detrás se esconde una argumentación estimulante: de alguna forma, se piensa que 'la evolución de cualquier componente singular de un sistema está determinada por los demás con los que interactúa. La información sobre los componentes relevantes está, pues implícitamente contenida en la historia de cualquier componente singular' (Crutchfield, et al., 1987, pág. 87). Nótese también que no se hace necesario conocer las ecuaciones que rigen la dinámica, por lo que esta técnica se muestra tremendamente útil en todos aquellos casos en los que carecemos de dicho conocimiento, es decir, la mayor parte de las veces.

Ejemplifiquemos la realización de un mapa de retardo. Por ejemplo, tomemos una serie temporal como pueda ser la sucesión de temperaturas durante unos pocos meses a fin de caracterizar la dinámica climática. Cada valor recoge la temperatura de un día, tomada siempre a la misma hora, en el mismo lugar y con el mismo aparato métrico. El mapa de un retardo nos dibuja una imagen como la siguiente.

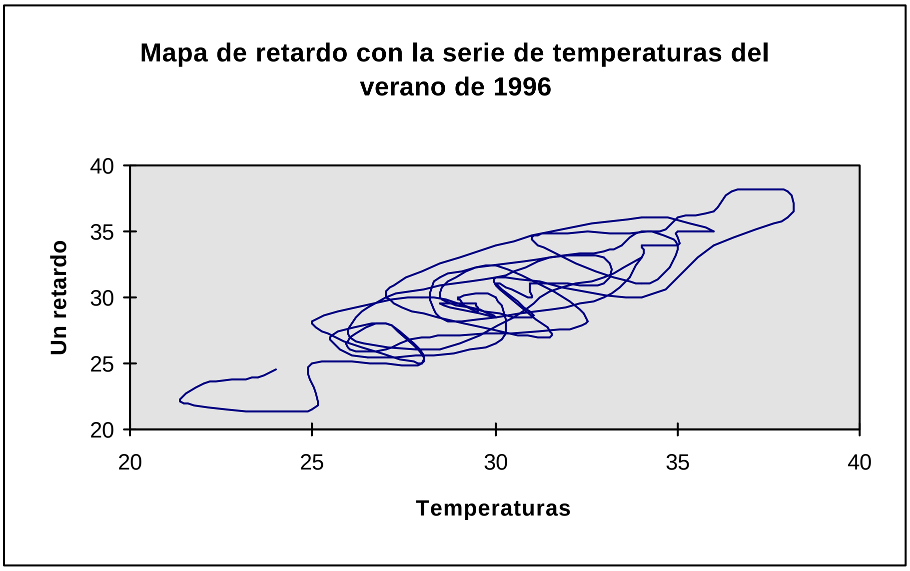


Figura 15: Mapa de retardo de una serie cronológica perteneciente a la medición de la temperatura durante 76 días consecutivos del verano de 1996.

Como hemos apuntado, para la utilización de los mapas de retardo se necesita la recogida de datos de una de las variables pertenecientes al sistema a lo largo de un cierto periodo de tiempo. Basta con el conocimiento de una serie temporal correspondiente a una de las variables del sistema para determinar la naturaleza del atractor, si lo hubiera, que rige la dinámica del sistema (Schaffer, 1984; Crutchfield, et al., 1987; Jou, 1995; Bascompte, 1995).

Gracias al teorema de Withney, desarrollado por Takens (1981), se demuestra de manera matemática que con una sola serie temporal podemos reconstruir toda la información que no tenemos -para los fines aquí perseguidos de caracterización del atractor- y reproducir el atractor subyacente trabajando con esta serie temporal al realizar los mapas de retardo. Frente a datos debidos al azar que generan una imagen borrosa ocupando todo el espacio, las dinámicas deterministas muestran figuras visibles. Con esta técnica podemos saber el tipo de atractor que rige la dinámica, calcular su dimensión y sus exponentes de Lyapunov (ver apartado 3.3.3.- Medidas del caos).

3.2.2.2.- Tipos de Atractores.

En esencia, y entrando en la tipología de los atractores, son tres los tipos básicos de atractores que podemos encontrar en cualquier sistema dinámico (e.g. Crutchfield, et al., 1987; Dubois, et al., 1987; Haken y Wunderlin, 1990; Eckmann y Mashaal, 1991; Simó, 1991). Dos de ellos ya fueron descritos por Poincaré, sumideros y ciclos límites. El tercer tipo, lo intuyó, pero fue un problema que le desbordó. Se encontró con él al afrontar un problema que propuso el rey Óscar II de Suecia sobre si el sistema solar era estable.

Describamos los tipos básicos de atractores. En primer lugar, tenemos los atractores de *punto fijo*, aquellos atractores que atraen al sistema hacia una situación muy concreta o estado particular. Se trata, como hemos visto antes, de sumideros. Por ejemplo, un péndulo, salvo que conste de mecanismo de propulsión, siempre tiende a acabar en el punto de máxima energía potencial, parado, sin movimiento. Este punto representa el punto fijo atractor para el sistema péndulo.

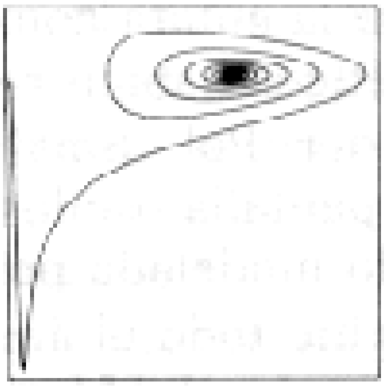


Figura 16: Atractor de punto fijo captado por un mapa de retardo (extraído de Gleick, 1987, pág. 57).

El segundo tipo básico de atractor es el denominado *ciclo límite*. El ciclo límite representa un comportamiento cíclico, periódico. La dinámica relacional entre depredador y presa de un sistema ecológico sigue un atractor de ciclo límite. Por ejemplo, en un lago donde cohabiten lucios y carpas ocurrirá que habrá temporadas en las que las carpas abunden dada la escasez de lucios. Tal abundancia de carpas representará unas buenas condiciones para que la población de lucios aumente, ya que cuentan con alimento. Cuando la población de lucios haya aumentado hasta cierto punto, ocurrirá que la población de carpas decrecerá debido a la elevada cantidad de depredadores, lo que a su vez conllevará, tiempo después, a la disminución de lucios por la falta de alimentos. Disminuida la población de lucios, la población de carpas tiene más oportunidades de volver a aumentar, reiniciándose el ciclo. En la naturaleza, aunque el ejemplo anterior es claramente factible (por ejemplo, la Hudson's Bay Company, compañía peletera de Canadá, muestra en sus largos registros de más de 200 años oscilaciones cuasi periódicas en las campañas de pieles del lince y la liebre de las nieves; recogido por Schaffer, 1984), son más comunes los ciclos límites que recogen un mayor número de variables, especies en nuestro ejemplo.

Resulta de interés constatar que en los ciclos límite se pone de relieve cómo la conducta individual, regular o irregular, determinada o al libre albedrío, como se prefiera, da lugar a pautas regulares en la conducta del colectivo.

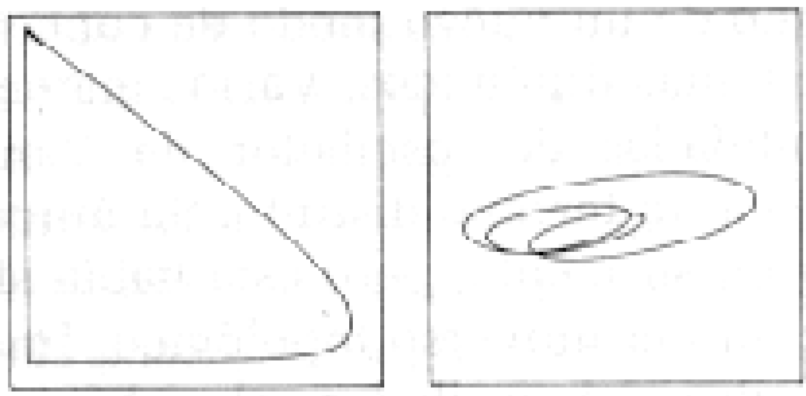


Figura 17: Dos ejemplos de atractores de ciclo límite captados por el mapa de retardo. En el primer caso, se trata de un atractor de un ciclo, mientras el segundo presenta un ciclo de periodo tres (extraído de Gleick, 1987, pág. 57).

Las dinámicas relacionales entre depredador y presa nos dan pié a pensar en la existencia de ciclos límites que rivalicen entre sí. Por ejemplo, y continuando con nuestro ejemplo de lucios y carpas, podemos introducir en la ejemplificación una tercera especie, el hombre actuando como otro depredador, y obtendremos dos ciclos límites acoplados. Los ciclos límites acoplados dan lugar a una nueva figura, un *toro*, con una forma de rosquilla y que describe dos ciclos límites a la vez: uno el que recorre la rosquilla a lo largo de su circunferencia más larga y, un segundo que recorre la rosquilla en su circunferencia corta. Aunque podríamos considerar el toro como un nuevo tipo de atractor (Crutchfield, et al., 1987), hemos de percatarnos que, en lo esencial, describe un comportamiento periódico al igual que ya hacen los ciclos límite.

Finalmente, están los *atractores extraños* (Ruelle y Takens, 1971). Un atractor extraño es un atractor no periódico, el cual no se repite jamás (Hofstadter, 1982). Su órbita nunca se cruza con otra anterior. Se trata de un número infinito de curvas y superficies, encerradas en un espacio finito, y en el que pueden detectarse los movimientos básicos descritos por la Topología de estiramiento, comprensión y torcimiento. Se trata de la '*especie de entramado, de tejido, de red de mallas infinitamente fina*' que vislumbró Poincaré en el problema de la estabilidad del sistema solar (recogido por Chabert y Dalmedico, 1991, pág. 720).

Como vimos en un apartado anterior, en 1963 Edward Lorenz descubrió, antes de que dicho objeto hubiera sido descrito por Ruelle y Takens, el primer atractor extraño en un estudio de simulación sobre el clima meteorológico. No fue el único que durante la década de los sesenta visionó atisbos de atractores extraños. Al menos son conocidos otros tres autores (Gleick, 1987), el astrónomo francés Michel Hénon, el ingeniero eléctrico japonés Yoshisuke Ueda y el matemático norteamericano Stephen Smale, quienes se toparon con objetos similares.

3.2.2.3.- Atractores Extraños y estudios sobre la Turbulencia en fluidos.

Los atractores extraños representa un orden sutil en el aparente caos y, bajo el nombre de *turbulencia*, han llamado la atención a numerosos científicos de este siglo. David Ruelle, Eberhard Hopf, Lev Landau, o hasta el propio Leonardo da Vinci, son algunos de los más destacados. En la Biblioteca Real de Windsor, en Inglaterra, pueden contemplarse una serie de dibujos de Leonardo da Vinci en los que intenta representar el movimiento de un fluido como el agua. Da Vinci representaba el fluir turbulento del agua como una serie de remolinos, compuestos a su vez de remolinos más pequeños, y así sucesivamente. Intuitivamente, da Vinci supo recoger una característica definitoria de lo que hoy se conocen como atractores extraños: la autosimilitud de formas a diferentes escalas.

En 1944, Lev D. Landau, físico ruso y premio Nobel en 1962, concibió la turbulencia como un fenómeno que aparecía de manera progresiva en los movimientos de un fluido a medida que estos se iban haciendo más complejos. Teorizó que el movimiento turbulento aparecía como una superposición de multitud de movimientos periódicos distintos. De otra forma, Landau establecía una ruta que conducía hacia la turbulencia. Poco después, en 1948 Eberhard Hopf construiría un modelo matemático, basado en la hipótesis de Landau, y que servía para describir las bifurcaciones que conducían a la turbulencia. Desde entonces, y hasta la década de los ochenta, la teoría de Landau-Hopf ha sido la teoría aceptada en la comunidad científica como la válida interpretación de la aparición del fenómeno turbulento en los fluidos. La teoría de Landau-Hopf prevé una serie de puntos críticos, conocidas como inestabilidades de Hopf, en los que la dinámica del fluido da saltos de una atractor sencillo a otro más complejo. Así, en la primera inestabilidad de Hopf, el fluido pasa de una dinámica regida por un atractor de punto fijo a un atractor de ciclo límite. En la segunda inestabilidad de Hopf, el sistema salta de la dinámica cíclica a una regida por un atractor de tipo toro. En la tercera inestabilidad, el sistema salta a un atractor toro de cuatro dimensiones. En la cuarta inestabilidad de Hopf, salta a una dinámica regida por un atractor toro de cinco dimensiones. Y así sucesivamente. En definitiva, la turbulencia según la teoría de Landau-Hopf sería una dinámica regida por un atractor toro multidimensional, complejo en el sentido del gran número de dimensiones incluidas.

En 1971 en un célebre artículo de David Ruelle y Floris Takens titulado "*On the nature of turbulence*", se propondrá, desde una visión topológica, una nueva forma de entender la turbulencia y su formación. Ruelle y Takens probarán, de una manera estrictamente matemática, que la teoría de Landau-Hopf es válida en lo que respecta a las dos primeras bifurcaciones: los saltos de punto fijo a ciclo límite y de ciclo límite a toro. Pero en la tercera bifurcación, en la tercera inestabilidad de Hopf, la que debiera conducir a un toro de cuatro dimensiones, comprobarán que el atractor toro comienza a descomponerse, y en lugar de presentar una dimensión igual a 4, la extraña figura emergente posee una dimensión fraccional situada entre 2 y 3. Ruelle y Takens bautizaron a este nuevo atractor como *atractor extraño* y dieron a entender que muchos sistemas dinámicos, aparentemente desordenados, tendrían atractores de esta clase.

Aunque la visión de Ruelle y Takens era correcta matemáticamente e incluso atractiva (bastaban tres variables para generar una dinámica a la vez inestable y con un atractor subyacente) se precisaba de la comprobación experimental de la misma. Ello ocurriría cuatro años después en unos estudios de laboratorio. Jerry Gollub y Harry Swinney en 1975, físicos de la Universidad de Texas, estudiando el movimiento producido en un líquido contenido entre dos cilindros, de los cuales el interno se mueve a velocidades cada vez mayores, encontraron las tres inestabilidades propuestas por Ruelle y Takens midiendo la velocidad del fluido en un punto dado. La primera que produce el salto hacia un atractor de ciclo límite. La segunda que conlleva el salto hacia un toro. Y la tercera en la que aparece la extraña criatura turbulenta, el atractor extraño. La teoría de Ruelle-Takens sobre la turbulencia recibía un primer apoyo experimental.

Robert Shaw, de la Universidad de California en Santa Cruz, junto a otros colegas, encontrará la misma transición hacia el caos en el estudio detallado de algo tan cotidiano como el ruido que hace un grifo que gotea. Dejando caer las gotas sobre un micrófono, registraba el intervalo temporal entre gota y gota, y representaban dicha sucesión temporal en un mapa de retardo. Abriendo cada vez más, y de manera progresiva, el caudal del grifo, hallaron los regímenes pertenecientes al punto fijo, dinámica periódica, dinámica periódica de dos frecuencias o toro y, finalmente, dinámica caótica (ver Crutchfield, et al. 1987; págs. 87-89). Podría haberse predicho que la intervención aleatoria de causas externas como pequeñas vibraciones o corrientes de aire harían que la relación entre intervalos de formación de gotas fuese nula. En tal caso, la reconstrucción del atractor en un mapa de retardo nos hubiera dibujado una nube uniforme de puntos sin ningún rasgo distintivo. No fue así. Los datos obtenidos y representados en los mapas de retardo dibujan una forma de herradura propia del proceso de estirado y plegado característico de los atractores extraños. El ejemplo del grifo que gotea es un ejemplo más de cómo en la conversión de un fluido laminar a un fluido turbulento, aparece la sucesión de estados que predijesen Ruelle y Takens.

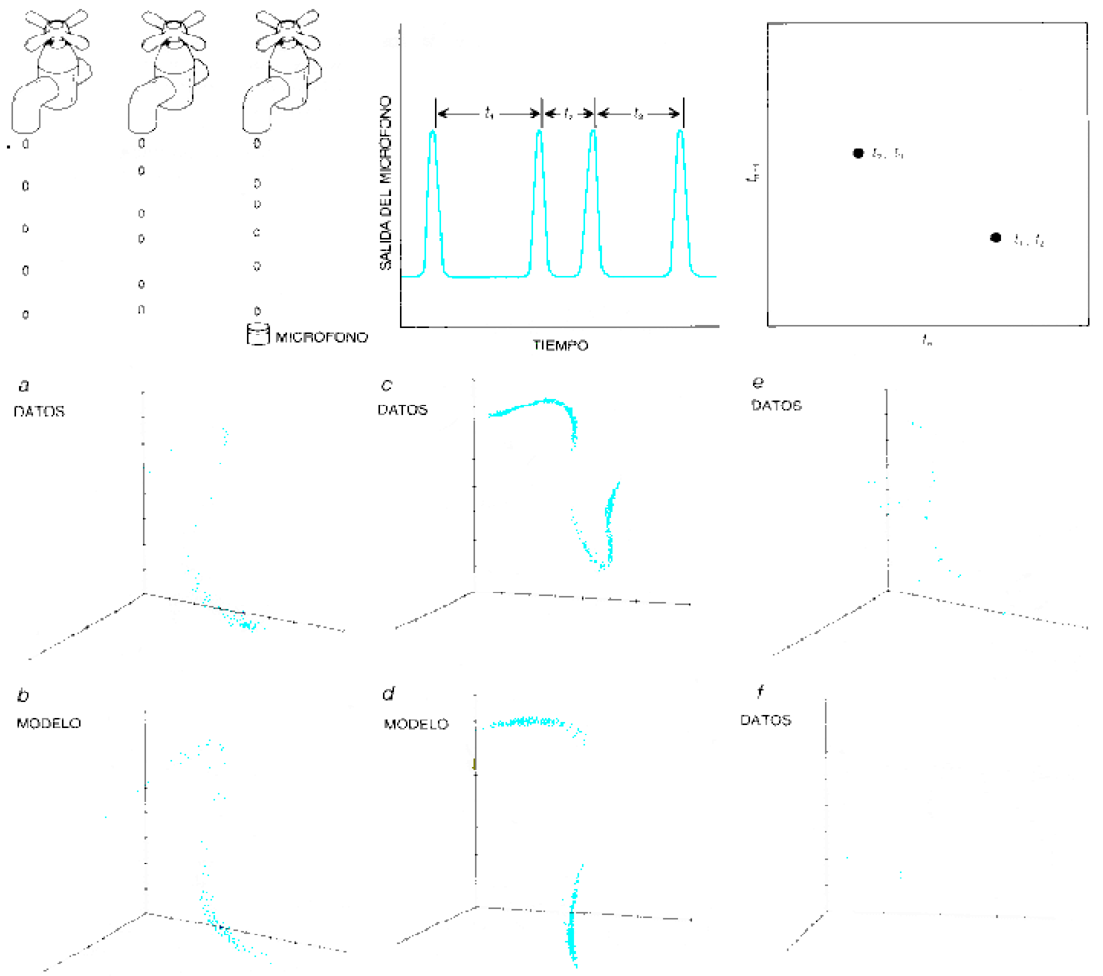


Figura 18: Experimento del grifo que gotea (Robert Shaw). En los mapas de retardo, en esta caso tridimensionales, se representa los puntos según sus coordenadas en tres momentos temporales t_n, t_{n+1} y t_{n+2}, es decir, los intervalos temporales entre gota y gota con un doble retardo, a fin de generar una imagen del atractor tridimensional. Los atractores extraños reconstruidos con un grifo real (a, c) se correlacionan favorablemente con variantes del atractor de Hénon (b, d). Los casos e y f se reconstruyeron a partir de elevados flujos de agua, y revelan atractores aún más complejos (imagen extraída de Crutchfield, et al., 1987, pág. 87).

Conocida la existencia de los atractores extraños, científicos de diferentes disciplinas se embarcaron en su búsqueda. En los últimos años se han encontrado un número creciente de sistemas con atractores extraños en sus dinámicas. Entre ellos en el diagrama de convención de un fluido calentado desde abajo (Libchaber, 1982; Dubois, et al., 1987), los latidos de las células del corazón del pollo (Guevara, Glass y Schrier, 1981), la oscilación de los niveles de concentraciones en reacciones químicas inestables, diferentes osciladores eléctricos y mecánicos (Crutchfield, et al., 1987), en las oscilaciones en fuentes celestes de rayos X (van der Klis, 1989), la dinámica de las partículas que conforman los anillos de Saturno (Hénon, 1989), en el estudio del clima terrestre (Fraedrich, 1986; Essex, et al., 1987; Tsonis y Elsner, 1988; Keppenne y Nicolis, 1989; Nicolis, 1991), en la secuencia de glaciaciones del Cuaternario (Nicolis y Nicolis, 1987), en el ritmo cardiaco de personas sanas frente al ritmo cardiaco de personas con problemas de corazón en las que aparecían atractores periódicos (Goldberger, Rigney y West, 1990; Moragrega y Contreras, 1994), en la actividad eléctrica cerebral en humanos (Babloyantz, et al., 1985; Dvorak y Siska, 1986; Pritchard y Duke, 1992; Fell, et al., 1993), incluso hay estudios que encuentran que enfermedades como la epilepsia llevan asociadas una actividad electroencefalográfica más periódica que estados de normalidad (Freeman, 1991; Mandell y Selz, 1991), también en la dinámica de las membranas de las células nerviosas (Aihara, 1991), o en la epidemiología de enfermedades como el sarampión, la rubéola, la polio o la varicela (Schaffer y Kot, 1985; Olsen y Schaffer, 1990) así como en otras dinámicas de poblaciones ecológicas (Witteman, et al., 1990; Turchin, 1993; Hanski, et al., 1993).

En definitiva, se descubrió que una variedad importante de sistemas no lineales exhibían comportamientos caóticos, apareciendo éste entonces como una dinámica universal de dichos sistemas y de medición cuantitativa posible (Cvitanovic, 1989).

3.2.2.4.- Paradojas en los Atractores Extraños.

Como ya hemos apuntado, los atractores extraños presentan la paradoja de recoger un número infinito de órbitas y trayectorias confinadas dentro de un espacio finito. Para ello es preciso que las trayectorias se replieguen sobre sí mismas, una y otra vez, de tal forma que, si ampliamos una región del atractor extraño, obtendremos nuevos matices, nuevas trayectorias antes no visibles, y que seguirán apareciendo si ampliamos *ad infinitum* el atractor (ver figura 19). De otro manera, los atractores extraños presentan la propiedad de autosimilitud de formas a diferentes escalas o de invarianza bajo escala, lo cual viene a decirnos que son estructuras fractales (Mandelbrot, 1975, 1977; ver cuadro 3).

El plegamiento en los atractores extraños se hace necesario por cuanto éstos tienen un tamaño finito y, a la vez, dan cuenta del fenómeno de divergencia de trayectorias o efecto mariposa ya visto. La única solución para mantener una dinámica que presenta la propiedad de divergencia de trayectorias en un espacio finito consiste en el replegarse sobre sí mismo (Crutchfield, et al., 1987; Dubois, et. al, 1987; Haken y Wunderlin, 1990; Tsonis, 1992). Digamos que el atractor extraño es el fruto de una tensión topológica: de un lado estirarse para dar cuenta del efecto mariposa, de otro plegarse ya que debe permanecer confinado en un conjunto concreto de estados posibles. Algo parecido, pero aún más extremo y complejo, a la tensión entre crecimiento y permanecer pequeño que se produce en una concha con forma de caracol.

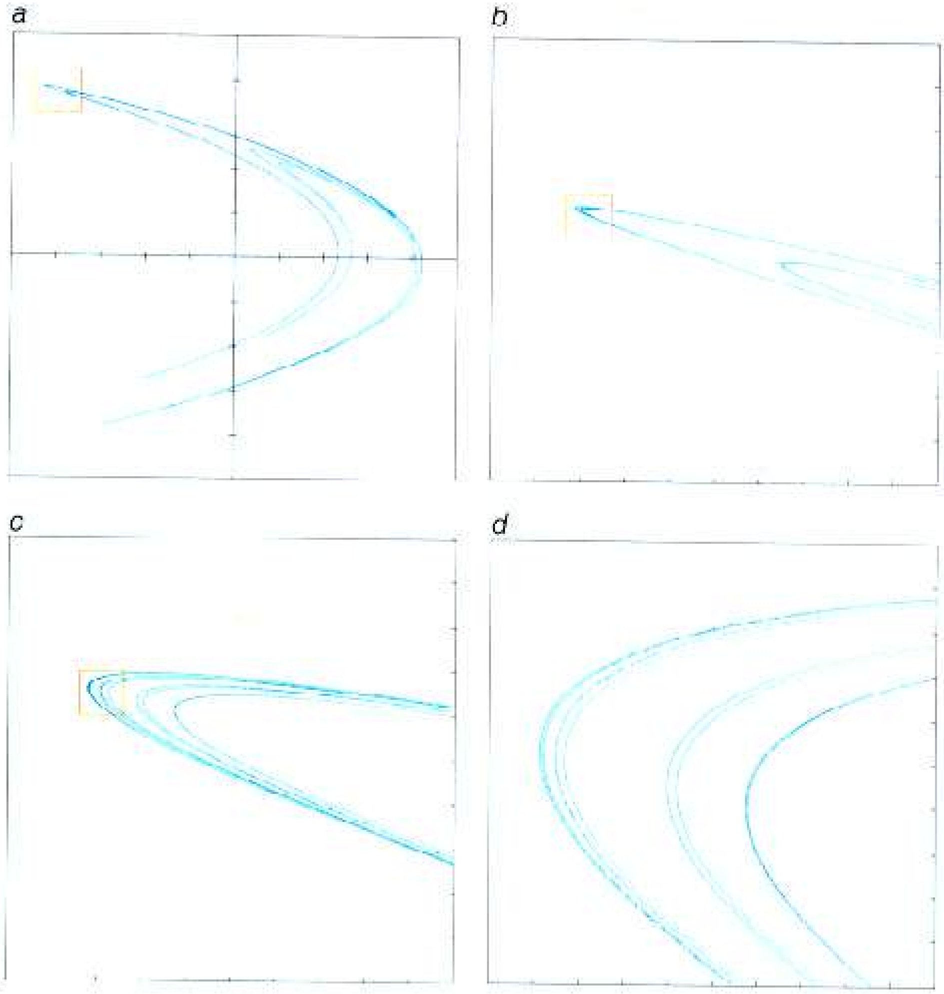


Figura 19: Amplificación sucesiva en un atractor extraño, en este caso el conocido atractor de Hénon (1976), y en el que podemos apreciar el fenómeno de la autosimilitud a diferentes escalas: la sucesiva ampliación de la zona marcada nos vuelve a revelar una estructura de líneas similar. (Imagen extraída de Crutchfield, et al. 1987, pág. 85).

Además, los atractores extraños presentan, cuando menos, otras dos paradojas. Por definición, un atractor, del tipo que sea, es estable: es la zona del espacio de fases que atrae las trayectorias de un sistema dinámico y lo retiene confinado en ella. Ahora bien, en un atractor extraño se cumple, y sólo en este tipo de atractores, que dos condiciones iniciales próximas devienen en puntos muy alejados gracias a la divergencia de trayectorias (el efecto mariposa ya visto). De otra forma, el atractor extraño da cuenta de sistemas con dinámicas inestables. Estabilidad e inestabilidad, polos opuestos de un continuo, quedan unidos en los atractores extraños (Gleick, 1987; Munné, 1993).

Finalmente, y en clara relación con la convivencia entre estabilidad e inestabilidad antes señalada, en un atractor extraño también aparecen a la vez rasgos de orden y de desorden. Frente a las dinámicas perfectamente ordenadas descritas por los puntos fijos y ciclos de diverso tipo, en los atractores extraños las dinámicas descritas son claramente más desordenadas. De entrada, ocupan más espacio del propio espacio de fases, sus trazos son más borrosos, menos nítidos. Pero tampoco son totalmente desordenados. Frente a una dinámica totalmente aleatoria que quedaría recogida como una nube de puntos homogéneamente distribuida llenando por completo el espacio de fases, los atractores extraños se nos presentan como elegantes formas geométricas. Aparece un orden aunque claramente distinto a los órdenes de dinámicas de punto fijo o cíclicas. Se trata de un orden más complejo.

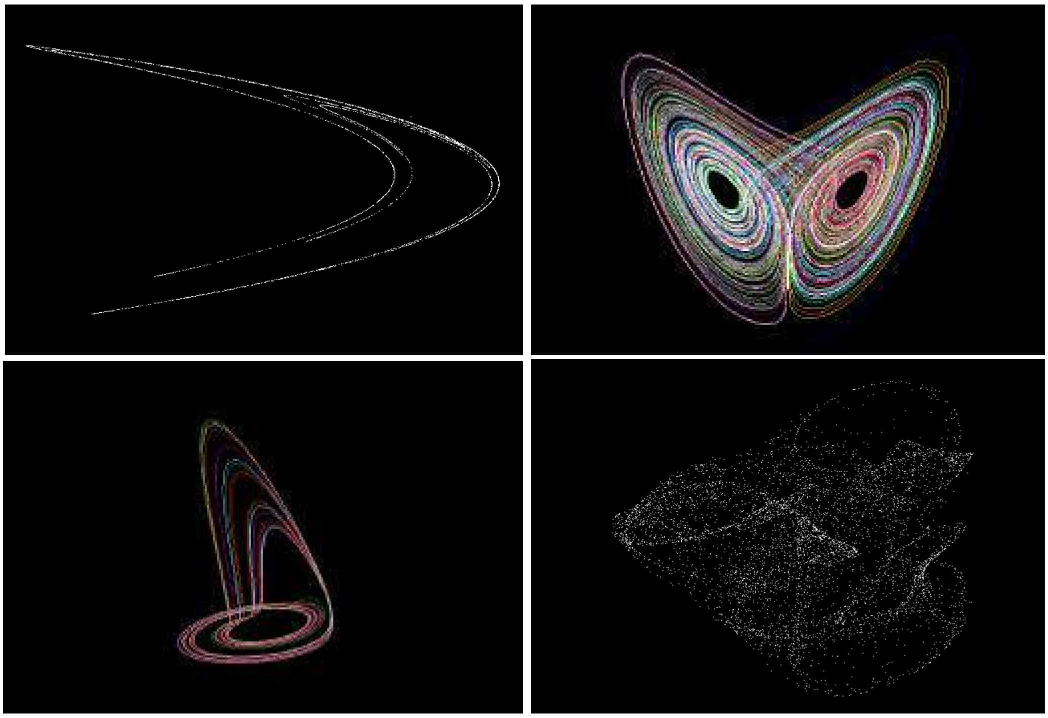


Figura 20: Cuatro ejemplos de otros tantos atractores extraños ya clásicos. Los atractores de Hénon, Lorenz, Rössler y Pickover. Algunos de ellos ya han sido hallados en experimentaciones de diverso tipo. Es el caso del atractor de Rössler observado en flujos de fluidos y en algunas reacciones químicas, o del atractor de Hénon del que se ha hallado una variedad en el experimento de Shaw sobre el grifo que gotea.

Cuadro 3: Estructuras fractales: una geometría de la naturaleza.

Las estructuras fractales se han constituido hoy en toda una nueva geometría con la que dar cuenta de los aspectos quebrados y rotos de las estructuras naturales. Las montañas no son conos, los planetas no son esferas, la costa de un país no es una línea recta. Frente a las figuras clásicas, idealizadas, de una línea, un plano, una esfera, un triángulo, un cuadrado, un cono, etcétera, de la geometría euclídea, la geometría fractal se ha fijado en formas rotas, irregulares y fragmentadas.

La geometría fractal ha sido desarrollada por Benoît B. Mandelbrot (1924-) cuyas obras principales podemos encontrar traducidas al castellano (1975: *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*, y 1977: *La geometría fractal de la naturaleza*, ambas en Tusquets Editores).

Fractal es una palabra acuñada por Mandelbrot, proveniente del adjetivo latino *fractus*, con el que el autor supo recoger dos características básicas y definitorias de estas estructuras: su *fragmentación* o grado de irregularidad y su *propiedad fraccional* en lo que hace referencia a su dimensión. Así, y en primer lugar, la irregularidad o fragmentación de un fractal posee propiedades estadísticas. El grado de irregularidad o fragmentación se mantiene constante en las diferentes escalas que podamos profundizar dentro del fractal. Es la propiedad conocida como *invarianza escalar*.

Los fractales son estructuras autosimilares: dentro del fractal encontramos pequeñas estructuraciones muy parecidas, cuando no iguales, a la totalidad y, a su vez, dentro de estas pequeñas estructuraciones encontraremos nuevas estructuras, aún más pequeñas, que también son parecidas a la estructura global. Lo más interesante, al margen de la curiosidad de la repetición de formas a diferentes escalas, está en lo siguiente: el grado de irregularidad de todas esas estructuras, estructuras pequeñas, microestructuras, etcétera, es el mismo. ¡La irregularidad de un fractal tiene un carácter regular!

En segundo lugar, es característico de los fractales el tener una dimensión fraccional, una dimensión no entera. La dimensión fractal recoge el grado de irregularidad del propio fractal, irregularidad que sabemos se mantiene constante en las diferentes escalas del fractal.

Como padre de la nueva geometría, Mandelbrot creará un bello fractal, conocido hoy como el *conjunto de Mandelbrot*, partiendo de trabajos anteriores del matemático francés Gaston Julia. El conjunto de Mandelbrot se obtiene mediante la aplicación de la regla iterativa $z \div z^2 + c$, siendo z un numero complejo de la forma x + yi (x e y son números reales, e i es igual a la raíz cuadrada de -1) y c una constante. El conjunto está conformado por los puntos para los cuáles la aplicación de la regla iterativa permanece en valores dentro de un círculo de radio 2. El conjunto de Mandelbrot que hemos recogido aquí es una variante coloreada del mismo en el que los colores recogen los puntos que no se encuentran en el conjunto, variando el color según el número de iteraciones necesarias para escapar del conjunto. La iteración de una regla tan simple genera una figura de extraordinaria complejidad y riqueza de detalles. Simplicidad generadora de complejidad.

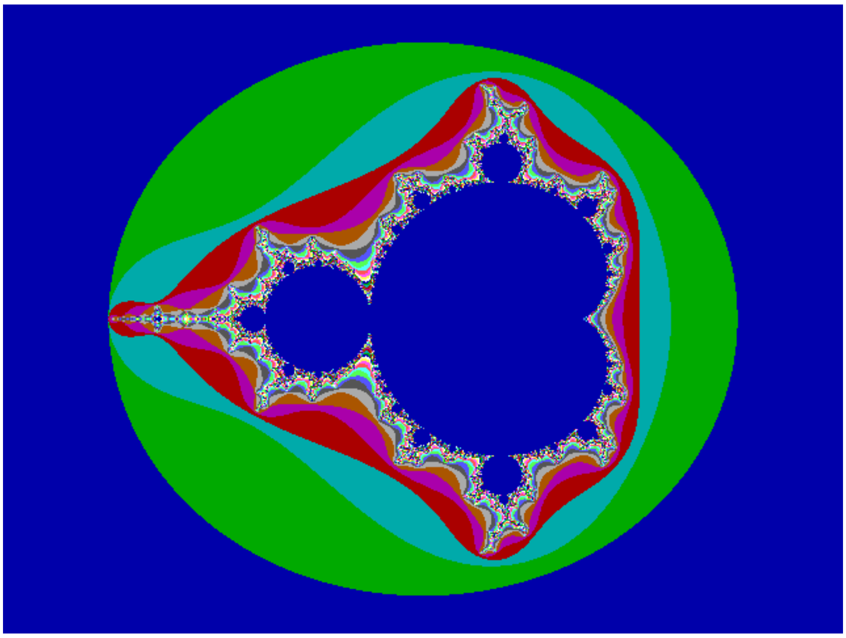


Figura 21: Conjunto de Mandelbrot.

3.2.3.- Estudios con la Ecuación Logística y Teoría de las Bifurcaciones.

Un nuevo impulso para el desarrollo de las teorías del caos va a venir de la mano de la biología y de una disciplina que nacería dentro de ésta a lo largo del siglo XX: la ecología. Interesados por el estudio de la evolución de poblaciones, los ecólogos comenzarán a trabajar con modelos de ecuaciones que iteraban continuamente. Se trataba de proponer ecuaciones que describiesen el crecimiento de una población de un determinado animal o vegetal y aplicarla de manera repetitiva sobre los resultados que ella misma iba aportando. Este tipo de estudios se englobaban dentro de la denominada *teoría de la iteración*. Por ejemplo, la población (x) del próximo año de una determinada especie viene determinada por la función f(x), siendo f(x) = 2x. Así para una población inicial de 4, tendríamos el siguiente año: f(4) = 2· 4 = 8, y el siguiente: f(8) = 2· 8 = 16, y el siguiente: f(16) = 2· 16 = 32, etcétera. Es decir, a cada año se duplica la población.

Funciones como la anterior pecaban de simplicidad y suponían un patrón de crecimiento continuo, propio de esquemas pre-malhtusianos, que no tiene en cuenta ningún tipo de restricción como por ejemplo la menor cantidad de alimentos a medida que aumenta la población. Era más realista pensar en funciones que, alcanzado un valor poblacional alto, comenzasen a bajar –implosionaban- y, llegado a un valor bajo, comenzasen nuevamente a subir –explosionaban-, persiguiendo un estado final de equilibrio poblacional.

Y con esta pretensión fue como se rescató la *ecuación logística*, propuesta por Verhulst en 1845 (Briggs y Peat, 1989). Dicha ecuación era como sigue:

$$x_{n+1} = N\, x_n\, (1 - x_n) \qquad (7)$$

siendo x_{n+1} la población esperada en el próximo año,
N la tasa de crecimiento y
x_n la población del año en curso.
Los valores de x son recogidos de forma normalizada entre 0 y 1, así un 1 recoge el valor máximo posible de la población y un 0 su extinción.

La ecuación logística es muy parecida a las que se proponían dentro del marco de crecimiento constante, salvo que contiene un término no lineal, $(1 - x_n)$, que limita el crecimiento, ya que, cuando x_n se hace grande, $(1 - x_n)$ se hace pequeño. Con ello, la ecuación logística nos da cuenta de una dinámica con crecimiento autocontenido, recogiendo sutilmente con el término $(1 - x_n)$ aquellos factores que impiden un crecimiento ilimitado. En términos topológicos, diríamos que mientras el término x_n estira el sistema, el término $(1 - x_n)$ lo pliega (Briggs y Peat, 1989).

3.2.3.1.- Modelos Matemáticos Sencillos que generan Dinámicas Complejas.

Robert May, biólogo de la universidad de Princeton, trabajará con la ecuación logística estudiando el comportamiento de la misma según diferentes tasas de crecimiento N (May, 1974, 1976).

Ensayando con diferentes valores de N, May pudo comprobar la complejidad que encerraba dicha ecuación. De alguna forma, al aumentar la tasa de crecimiento N, se estaba aumentando la tasa de no-linealidad, con lo cual, las puertas hacia nuevos comportamientos cualitativos quedaban abiertas. No sólo se afectaba el resultado numérico (cantidad), sino que también se influía en su cualidad. Así, cuando N tomaba valores bajos, la población se establecía en un valor de equilibrio. Cuando N se hacía más grande, la población oscilaba entre valores alternantes. Al aumentar aún más N, la población se comportaba de modo impredecible.

Algo que ayuda a magnificar los hallazgos de May es que el común de los mortales puede repetir sus simulaciones en una familiar hoja de cálculo o con una sencilla calculadora. Procedamos a ello, antes recordemos la formulación de la ecuación logística:

$$x_{n+1} = N\, x_n\, (1 - x_n) \qquad (7)$$

Para valores de N #1, la población acaba evolucionando hacia un valor de 0, es decir, la población perece. Probemos un ejemplo. Partiendo de $x_n = 0.67$ y con N = 0.8, obtenemos la siguiente secuencia iterando la ecuación: 0.176, 0.116, 0.082, 0.060, 0.045, 0.034, 0.026, 0.020, 0.016, 0.012, 0.010, 0.008, 0,006, 0.005, 0.004, 0.003, 0.002, 0.002, 0.001, 0.001, 0.001, 0.000, 0.000, 0.000 (reteniendo aquí sólo los tres primeros decimales). Como decíamos, la evolución nos marca un camino hacia la extinción. Además, ocurre que, esta evolución es independiente del punto de partida x_n, es decir, y como ya sabemos, la dinámica tiene un atractor en el valor 0. Un atractor de punto fijo.

Para valores 1 < N < 3, la población acaba estableciéndose en un valor constante, diferente de 0 y, además, valor que es diferente en función de la tasa N. Probemos de nuevo con, por ejemplo, $x_n = 0.32$ y con N = 2.3. Obtenemos la siguiente serie: 0.500, 0.574, 0.562, 0.566, 0.564, 0.565, 0.565, 0.565. Tras unas pequeñas oscilaciones, la dinámica acaba instalándose en un valor que actúa, al igual que en el ejemplo anterior lo había hecho el valor 0, de atractor, ya que nuevamente dicha evolución es independiente del punto de partida x_n.

Tomemos nuevos valores de N. Para N = 2.8 y $x_n = 0.32$, la secuencia es: 0.609, 0.666, 0.622, 0.658, 0.630, 0.652, 0.634, 0.649, 0.637, 0.646, 0.639, 0.645, 0.640, 0.644, 0.641, 0.643, 0.641, 0.643, 0.642, 0.643, 0.642, 0.643, 0.642, 0.643, 0.642, 0.642, 0.642. El vagabundeo numérico se ha mantenido por más tiempo y tras veinticinco iteraciones la dinámica se estabiliza en el punto atractor 0.642. Ni que decir tiene que dicho punto de atracción es independiente del valor inicial de partida x_n. Para cualquier x_n que tomemos, la dinámica nos conducirá inequívocamente al atractor que representa el valor 0.642. Claro está, si tomamos un valor x_n próximo a este punto atractor, llegaremos más rápidamente a él. Para N = 2.9 y con el mismo punto de partida $x_n = 0.32$ se nos presenta una secuencia que necesita de cuarenta y ocho iteraciones para estabilizarse en el valor 0.655. Y para N = 2.99, se precisan de ¡nada menos que 341 iteraciones! para alcanzar el atractor, determinado en este caso por el valor de 0.665. Parece que mientras más se acerque N al valor de 3 mayor es el merodeo de los números antes de alcanzar el atractor.

May siguió probando valores y aumentó N a 3. Ocurre que cuando la ecuación logística toma la forma $x_{n+1} = 3\, x_n\, (1 - x_n)$, la dinámica descrita deja de tener un punto atractor. En su lugar, las soluciones se *bifurcan* y hace acto de presencia un doble punto atractor que, a modo de ciclo límite, conduce a la dinámica a una oscilación perpetua. Por ejemplo, para un valor $x_n = 0.25$, el ciclo se establece entre los valores 0.659 y 0.673. Si aumentamos aún más N a un valor de 3.4, el 0.25 inicial acabará dando vueltas entre los valores 0.451 y 0.842. Para más detalles, en este último ejemplo la secuencia reza así:

0.637 0.785 0.572 0.832 0.474 0.847 0.438 0.837 0.463 0.845 0.444
0.839 0.458 0.844 0.447 0.840 0.455 0.843 0.449 0.841 0.454 0.842
0.450 0.841 0.453 0.842 0.451 0.841 0.452 0.842 0.451 0.841 0.452
0.842 0.451 0.842 0.452 0.842 0.451 0.842 0.452 0.842 0.451 0.842
0.452 0.842 0.451 0.842 0.452 0.842 0.451 0.842 0.451 0.842 0.451

De otra forma, la población oscila entre dos valores que van sucediéndose de manera continua en el tiempo. A un tiempo de una población 0.842, población alta, sucede un tiempo de población 0.451, población media. Y a éste, nuevamente le sucede un valor de 0.842. Y vuelta a empezar.

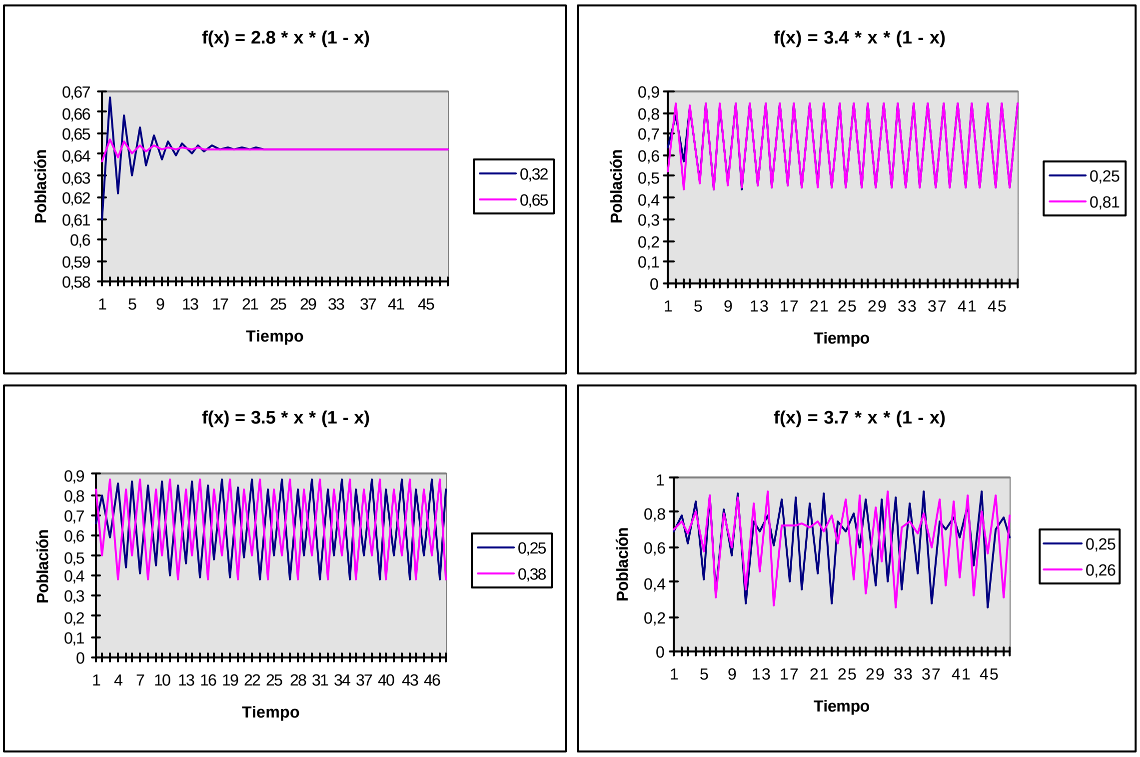


Figura 22: Diferentes desarrollos de la ecuación logística $x_{n+1} = N\, x_n\, (1 - x_n)$ con diferentes valores de N. Para N = 2.8, la dinámica acaba estableciéndose en un valor estable independientemente de la condición inicial de partida (gráfico superior-izquierda). Para una N = 3.4, la dinámica oscila en un ciclo de período dos. Nuevamente el desarrollo es independiente de la condición inicial (gráfico superior-derecha). Aumentando más N, con N = 3.5, el período se duplica y ahora la oscilación recorre cuatro puntos. Se trata de un ciclo de período cuatro que es seguido, una y otra vez, por las diferentes condiciones de las que podamos partir (gráfico inferior-izquierda). Finalmente, con tasas elevadas de N, como N = 3.7, el caos nos enseña su faz. Han desaparecido los puntos de equilibrio que atrapaban la dinámica y tampoco hay oscilación alguna. En su lugar, se nos presentan unas series que parecen regidas por el azar. Además, con la peculiaridad de que dos condiciones iniciales próximas

(se han tomado 0,25 y 0,26) pronto acaban evolucionando de manera muy diferente (gráfico inferior-derecha).

Subiendo más la tasa N, en el valor de 3.45, el ciclo límite se rompe y la solución de dos puntos sufre una nueva bifurcación para dar lugar a una dinámica poblacional que oscila entre cuatro valores. Por ejemplo, para un $x_n = 0.25$, la oscilación final ronda los cuatro valores siguientes: 0.847, 0.433, 0.852 y 0.446. Y subiendo aún más la tasa N aparece nuevas bifurcaciones con ciclos de 8, 16, 32, ..., puntos que atrapan la dinámica. Parece como si una vez que hubiese aparecido una bifurcación ésta no es única y viene acompañada de una avalancha de las mismas.

Y cuando N llega a un número aproximado de 3.57 aparece el caos. En ese punto, la dinámica deja de tener un atractor aparente ya que la condición inicial x_n determina evoluciones distintas, de tal forma que, el sistema muestra dependencia sensible a las condiciones de partida. Por otro lado, la evolución poblacional parece regida por puro azar.

Pero la ecuación logística deparaba más sorpresas. A fin de visualizar de golpe el comportamiento total de la ecuación, May (1976) ideó un método gráfico en el que recogía los valores finales en los que se establecía la dinámica en función de N. En el eje de coordenadas recogió las diferentes tasas de crecimiento (N). En el de abscisas la población final. Se trataba ahora de representar el estado final que estabilizaba la dinámica para cada N. May obtuvo la siguiente figura.

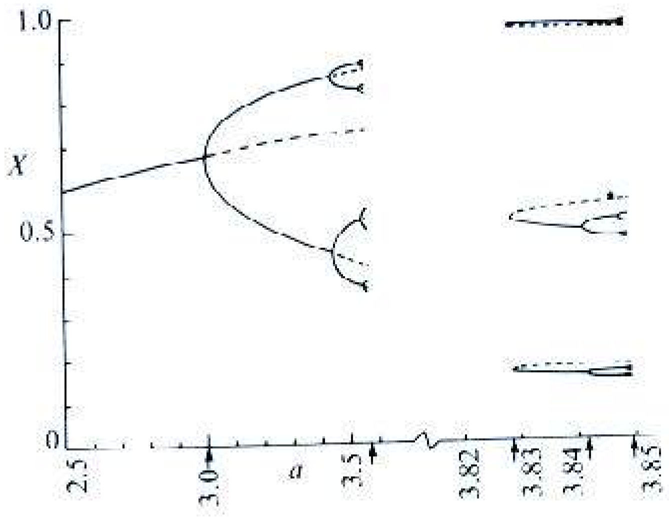


Figura 23: Ilustración con la que Robert May recoge la cascada de bifurcaciones que se da en la ecuación logística al ir aumentando N. La línea continua recoge estados estables, la discontinua estados inestables. De los valores 3.57 a 3.83 y 3.85 en adelante, May no dibujó nada dado que toda la región esta ocupada por puntos. Se trata de regiones caóticas. (Imagen extraída de May, 1976, pág. 462).

Y encontró algo nuevo. Igual que el caos surgía del orden allá por un valor de N = 3.57, cuando N tomaba el valor de 3.8284 un nuevo orden surgía del propio caos anterior. Ahora aparecía un ciclo de período 3, que se descomponía después en un ciclo de período 5, y detrás en un período 10. Y luego, nuevamente el caos. *El caos surge de la aplicación de una formulación determinista y el orden surge luego del caos a modo de intermitencias*. Intermitencias por cuanto el sistema vuelve a mostrar un comportamiento similar al que había mostrado tiempo atrás y que había desaparecido. De alguna forma se produce una recurrencia en el sistema por cuanto éste vuelve a un estado muy parecido a otro por el que ya pasó.

Con los medios actuales conseguimos obtener una imagen de mayor definición y encontrar nuevas ventanas de orden dentro del caos que no llegó a describir May. La ecuación logística nos dibuja un hermoso fractal en el que podemos profundizar y descubrir estructuraciones que se repiten una y otra vez como la progresiva duplicación de períodos o la aparición continua de intermitencias cada vez a menor escala (ver figura 24).

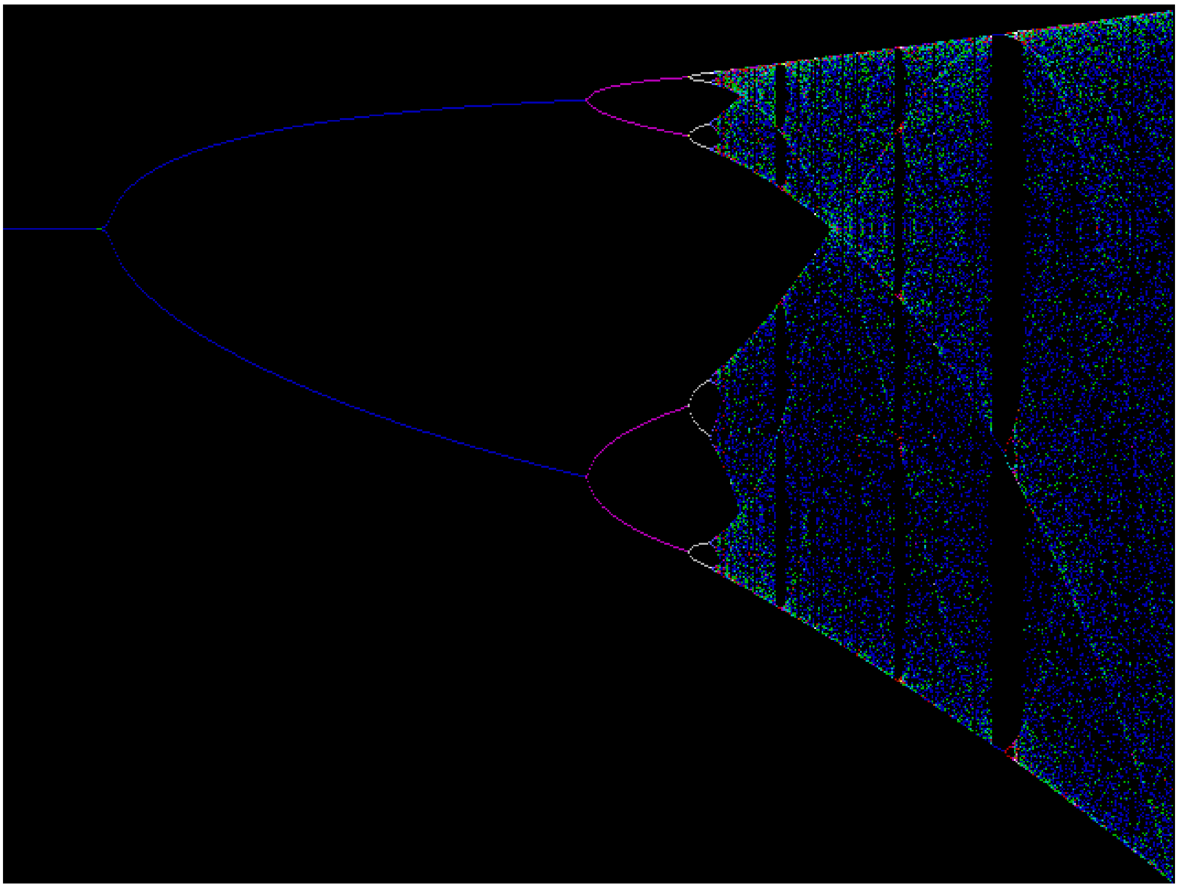


Figura 24: Gráfico completo de la cascada de bifurcaciones que proporciona la ecuación logística. No representamos los valores numéricos de ningún eje. El interés está en el comportamiento cualitativo de la ecuación. Puede apreciarse nítidamente como la sucesiva duplicación de períodos conduce al caos y como dentro del caos aparecen ventanas con rigurosa ordenación. Las diferentes tonalidades de gris recogen probabilidades de que la dinámica acabe estabilizándose en ese punto. (Imagen obtenida con el programa de fractales Fractint).

El que una sencilla ecuación matemática generase dinámicas complejas era, al igual que los hallazgos de Lorenz sobre el efecto mariposa, algo epistemológicamente revolucionario. Lorenz también había obtenido complejidad a partir de la simplicidad de tres ecuaciones y otras tantas variables, y Mandelbrot había hecho algo parecido operando con una ecuación de números complejos. Pero ahora el hecho se mostraba como más evidente. Con una sola ecuación y una única variable la dinámica resultante era de una complejidad infinita.

Por otra parte, para los ecólogos el que una ecuación fuera capaz de obtener dinámicas aperiódicas y fluctuantes era de sumo interés. En particular, porque hasta la fecha era común la propuesta de formulaciones que dibujaban una dinámica que alcanzaba un ideal estado de equilibrio o unos ciclos primorosos, cómodos luego de trabajar con análisis lineales. Hasta los años setenta, los especialistas de las diferentes ciencias de la vida (biología, ecología, epidemiología, medicina, etcétera) consideraban posible un solo tipo de evolución a largo plazo: alcanzar un estado de equilibrio, de estabilidad (May, 1991; Bascompte, 1995). Y ocurría que, en los datos empíricos, tales desarrollos no aparecían ni por asomo. Era común achacar la falta de periodicidad o la no consecución de equilibrios a fallas en la metodología de obtención de datos censales de las poblaciones. Ahora se presentaba una formulación, sencilla, que era capaz de dar cuenta de fluctuaciones como las que se observaban en dinámicas poblacionales, en la mutación de genes o en el desarrollo de epidemias. De otra forma, se presentaba el argumento que las fluctuaciones observadas podían ser de carácter puramente intrínseco a la propia dinámica.

Detrás vendría el estudio de series temporales naturales para detectar la presencia del caos, mediante la búsqueda de los atractores extraños. Éste se halló en sistemas de muy diversa índole, algunos de los cuáles ya han sido apuntados más arriba. Ampliemos ahora la lista. Schaffer y Kot (1985) encontraron caos en una serie epidemiológica sobre los casos habidos de sarampión en la ciudad de Nueva York entre 1028 y 1963, año en que se introdujeron campañas de vacunación. Forsythe et al. (1988) han dado cuenta de la dinámica caótica de cepas de malaria en poblaciones humanas. Nuevamente Schaffer (1984) ha encontrado caos en el número de pieles de lince cazadas en cada campaña por una compañía peletera canadiense. Olsen et al. (1988, 1990) encuentra caos en las series correspondientes a infecciones de rubéola, polio y varicela en niños daneses. Hanski et al. (1993) y Turchin (1993) en las oscilaciones poblacionales de roedores boreales. Son algunos de los trabajos más destacados.

3.2.3.2.- La Duplicación de Períodos como Ruta Universal hacia el Caos.

Los hallazgos de May con la ecuación logística eran muy interesantes, pero quedaba la sospecha sí no se trataría de una rareza matemática por lo demás sólo aplicable a dicha ecuación.

En 1978 Mitchell Feigenbaum, físico teórico del Laboratorio Nacional de Los Álamos, publicará un artículo en el que da cuenta de un rasgo universal de una serie de ecuaciones no lineales y recursivas con la forma $x_{n+1} = N\ f(x_n)$. Dichas ecuaciones presentan la misma ruta hacia el caos consistente en una duplicación continua de períodos que produce una cascada de bifurcaciones. Cascada de bifurcaciones que obedece a una regla numérica que Feigenbaum descubrió.

Se pensaba que los valores críticos en los que se producen las diferentes bifurcaciones eran específicos de cada sistema, de cada ecuación concreta. Feigenbaum (1978, 1979, 1980) descubre una relación abstracta con carácter universal para las ecuaciones no lineales y recursivas, una métrica entre la distancia a que se producen las diferentes bifurcaciones, una pauta geométrica que describe el camino evolutivo de un sistema no lineal hacia el caos.

Matemáticamente:

$$\lim_{n\_\mathrm{grandes}} \frac{b_n - b_{n-1}}{b_{n+1} - b_n} \rightarrow 4.669201609103... \qquad (8)$$

siendo $\$_n$, los puntos concretos en los que se producen las sucesivas bifurcaciones.

Es decir, la cascada de bifurcación presenta una pauta escalar. El número 4.6692, desde entonces conocido como *número de Feigenbaum*, nos proporciona el conocimiento completo de la cascada de bifurcaciones, y de la llegada del caos, con sólo saber la distancia concreta entre dos bifurcaciones contiguas. Y ello con independencia de la ecuación concreta. Sistemas diferentes, no lineales todos ellos, muestran comportamientos idénticos. Una regla universal subyace a todos ellos (Cvitanovic, 1989). Nuevamente, otro orden parece emerger de la caótica y alocada secuencia de bifurcaciones. La complejidad aumenta de forma geométrica con un orden (Feigenbaum, 1995).

Posteriormente, los científicos franceses Libchaber y Maurer, confirmaron experimentalmente el trabajo de Feigenbaum (Libchaber y Maurer, 1982; ver también en Gleick, 1987; Briggs y Peat, 1989). La duplicación de períodos apareció en todos ellos y el número de Feigenbaum también (Gleick, 1987; Stewart, 1989). La teoría era confirmada experimentalmente. La duplicación de períodos o cascada de bifurcaciones presenta un patrón escalar y se muestra como una ruta universal hacia el caos.

3.2.4.- Caos e Información: el Grupo de Santa Cruz.

Un nuevo impulso e importante desarrollo para las teorías del caos va a venir de la vinculación de éstas con la teoría de la información de Shannon y Weaver. Se asociará el caos con la información por cuanto una dinámica caótica contiene más información que dinámicas estables u periódicas en las que la información se repite una y otra vez. Y se llegará a la conclusión que la mayoría de los fenómenos biológicos sólo pueden producirse *en el borde del caos* en donde la capacidad de procesamiento de información es maximizada (veremos esto último cuando abordemos las aportaciones realizadas desde la ciencia de la complejidad).

En la universidad californiana de Santa Cruz, los físicos Robert Shaw, Doyne Farmer, Norman Packard y James Crutchfield, comenzarán a estudiar el comportamiento de los sistemas no lineales centrándose en las propiedades métricas de los atractores extraños. Estaban interesados en medir, dentro de lo que fuera posible, los atractores extraños, interesados por caracterizar métricamente la dependencia sensible a las condiciones iniciales, la impredecibilidad.

Con este fin rescataron una medida ya existente dentro de la topología y que daba cuenta de la divergencia de trayectorias: el exponente de Lyapunov (ver apartado 3.3.3.- Medidas del caos), encontrando que los sistemas caóticos, con atractores extraños, tienen, al menos, un exponente de Lyapunov positivo indicativo de que los puntos próximos tras el estirado se separan (Packard, et al., 1980; Froehling, et al., 1981). De este modo, el exponente de Lyapunov se convertía en una medida de la dependencia sensible a las condiciones iniciales, en una medida de la caoticidad del sistema.

También propusieron métodos para medir la dimensión, dimensión fractal, del atractor extraño (Froehling, et al., 1981; Farmer, et al., 1983) (ver apartado 3.3.3.- Medidas del caos) y hallaron como todos los atractores extraños conocidos hasta la fecha (el de Lorenz, el atractor de Hénon, el de Rössler, etcétera) presentaban una baja dimensionalidad, propia de dinámicas generadas por una pocas variables. La baja dimensionalidad se constituyó, al igual que la existencia de un exponente de Lyapunov positivo, en una característica indicativa de la presencia de caos determinista.

Exponente de Lyapunov y dimensión del atractor se han convertido en dos medidas esenciales de cualquier atractor extraño y, por ende, de cualquier sistema con dinámica caótica. Eso sí, se hace preciso conocer el atractor, algo no siempre fácil de conseguir. Shaw y compañeros (Packard, et al., 1980; Crutchfield, et al., 1987) propusieron un método en el cual bastaba conocer una serie temporal de una de las variables pertenecientes al sistema para recomponer el atractor (ver apartado 3.2.2.1.- Mapas de retardo) y así poder obtener ambas medidas. De otra forma, no se hacía necesario el conocimiento explícito de las ecuaciones que describían la dinámica.

Pero quizá la aportación más destacada del grupo de Santa Cruz a los estudios del caos fue la vinculación que establecieron con la teoría de la información (Shaw, 1981). La teoría de la información desarrollada por Claude Shannon y Warren Weaver a finales de los cuarenta es relativamente conocida en nuestra disciplina, sobra el presentarla aquí. Sí es importante recordar su nacimiento dentro de la ingeniería electrónica y que el término información es usado sin las connotaciones habituales de conocimiento o significado. Se trata más bien de la información que circulaba por los circuitos electrónicos y que era posible de medir, usar, almacenar. Su unidad de medida es hoy harto conocida: el bit.

Para entender la relación que Robert Shaw estableció entre la teoría del caos y la de la información sirvámonos de un ejemplo. Imaginemos una secuencia numérica como la siguiente: 2, 4, 6, 8, 10, 12, ..., secuencia que también podríamos especificar como "secuencia de los números pares enteros, empezando por 2". Imaginemos ahora otra secuencia totalmente aleatoria, como por ejemplo: 2, 17, 3, 1, 24, 23, 54, 15, 32, 6, ... A diferencia de la primera secuencia, en este caso, cada nuevo número es una sorpresa, cada número nos transmite una nueva información. Desde el punto de vista de la teoría de la información, la conclusión que podemos extraer es clara: mientras más aleatorio sea un mensaje, más información contiene.

Ahora, la relación con los sistemas caóticos se nos dibuja clara. Frente a dinámicas de punto fijo, un valor que se repite constantemente en el tiempo, o dinámicas cíclicas, unos valores por los que pasa periódicamente el sistema, los sistemas caóticos tienen la propiedad de no visitar el mismo lugar dos veces. Como diría Shaw, los sistemas caóticos, o en concreto los atractores extraños, son máquinas de información. *Cercano al azar, pero sin ser azar, el caos supone el máximo alejamiento del orden clásico en el que se maximiza la información*. De alguna forma, la no linealidad crea información donde no la hay. El movimiento fortuito no está en las ecuaciones de Lorenz, por ejemplo. "Parecía algo gratuito o algo brotado de la nada" (Doyne Farmer, declaración realizada en una entrevista con J. Gleick, 1987, pág. 250). La explicación que ofreció Robert Shaw a este hecho se halla en la relación entre diferentes escalas. En opinión de Shaw, los sistemas caóticos tienden un puente entre las macroescalas en que se cuentan y miden los objetos cotidianos, y las microescalas en que los átomos se agitan al azar. Al tender este puente, las macroescalas rescatan parte de la información que proporciona el azar de las microescalas. La información era capaz en estos sistemas de traspasar las microescalas para instalarse en las macroescalas. *El caos suponía la creación de información*. Por cierto, la analogía con fenómenos sociales de la relación entre fenómenos de carácter local y fenómenos globales está servida.

Para acabar, puede entenderse que la teoría de la información hizo corresponder a ésta con la entropía, lo cual supuso un hito por cuanto era habitual hasta la fecha la reciprocidad contraria (Hayles, 1990). Para nuestros intereses más inmediatos, es importante remarcar que para la teoría de la información, información y entropía no eran opuestas sino idénticas, y ello se hizo evidente cuando a la información se la desprendió del significado y se la asoció con la novedad. *La información es maximizada cuando hay una mezcla de certidumbre y de sorpresa*. Premisas ambas que acontecen en el caos que supone una mezcla de azar y de orden, sin llegar a ser ninguna de las dos cosas por separado.

3.3.- A modo de síntesis: ¿Qué es el Caos?

Afrontemos ahora, a modo de resumen de lo desarrollado hasta ahora desde una visión histórica, las características más destacadas de este 'nuevo' objeto científico conocido como caos.

El término caos fue utilizado por primera vez por Tien-Yien Li y James Yorke en 1975 en un artículo que llevaba por título 'Period three implies chaos'. Para ellos el caos era una dinámica difícil de diferenciar de un proceso puramente estocástico salvo que venía producida por ecuaciones deterministas. Poco después, en 1977, se celebraría el primer congreso especializado en la materia en Como, Italia, congreso que fue organizado por los físicos Joseph Ford y Giulio Casati. Hace, por tanto, más de veinte años que la ciencia del caos ha tomado consistencia dentro de disciplinas como la física y la matemática. Hoy podemos encontrar casi una veintena de centros dedicados a su estudio repartidos por todo el mundo como por ejemplo el Institute of Nonlinear Science de la Universidad de California en Santa Cruz, el Center for Nonlinear Dynamics de la Universidad de Texas en Austin, el Institute of Nonlinear Science de la Universidad de California en San Diego, el Nonlinear Physics Group del Institut für Angewandte Physics en Alemania, el Control of Complex Systems Lab. de la Russian Academy of Sciences, el Grupo de Sistemas Complejos de la Universidad Politécnica de Cataluña, etcétera.

Recogiendo el trabajo de Edward Lorenz, el cual al fin y a la postre es el padre (o al menos uno de sus padres principales) de la teoría del caos, podríamos decir que con el término caos nos referimos a '*procesos que parecen comportarse de acuerdo con el azar aunque, de hecho, su desarrollo esté determinado por leyes bien precisas*' (Lorenz, 1993, pág. 2). También pueden incluirse 'fenómenos que son ligeramente aleatorios, siempre que su mayor aleatoriedad aparente no sea un subproducto de su leve y auténtica aleatoriedad' (ob. cit., pág. 3). Una definición similar la podemos encontrar en la propuesta en una conferencia internacional sobre caos según la cual el caos es un '*comportamiento estocástico que ocurre en un sistema determinista*' (Stewart, 1989, pág. 22).

Es importante recoger una distinción que realiza Lorenz (ob. cit.) al diferenciar entre lo que denomina *caos total* y *caos limitado*. Los sistemas caracterizados por un caos total mostrarían dependencia sensible en la mayoría de sus órbitas. Mientras tanto, cuando sólo algunas de las órbitas muestra dependencia sensible siendo, en cambio, la mayor parte de ellas periódicas o cuasiperiódicas, el sistema estaría caracterizado por un caos limitado. La visualización como continuo de la serie dinámica de punto fijo-cíclica-caótica-aleatoria es muy útil y acorde con la exposición anterior. El caos total estaría más cercano al azar, mientras que el caos limitado se hallaría más cerca de la dinámica cíclica.

Una apreciación parecida la encontramos en el trabajo de Bak y Chen (1991) cuando diferencian un *caos débil* del comportamiento *caótico absoluto*. Los sistemas plenamente caóticos estarían caracterizados porque las predicciones se hallarían sujetas a una corta escala temporal. Por el contrario, los débilmente caóticos permitirían predicciones a un más largo plazo.

Con espíritu de síntesis podríamos definir el caos como *un tipo de comportamiento que caracteriza la dinámica de un sistema la cuál, pese a estar determinada por leyes totalmente deterministas exhibe un comportamiento aparentemente "aleatorio" no siendo posible, además, la realización de predicciones a largo plazo* (e. g. Crutchfield, et al., 1987; Stewart, 1989; Haken y Wunderlin, 1990; Eckmann y Mashaal, 1991; Ritchter, 1996). Y entendiendo que el 'largo plazo' no obedece tanto a ritmos temporales externos (minutos, horas, días, etcétera) como a ritmos internos de cada sistema: ritmos con los que se producen los movimientos topológicos de estirado, plegado y compresión. A mayor rapidez de estos movimientos, menor es la escala temporal (ahora sí, en minutos, horas, días, etcétera) para la que se pueden realizar predicciones con éxito.

3.3.1.- Características del Caos.

Podemos considerar cinco las características o aspectos básicos que configuran el caos: la no linealidad, su marcado carácter dinámico, la sensibilidad a las condiciones iniciales, el estar regido por ecuaciones deterministas sencillas y la sutil mezcla de orden y desorden.

En primer lugar, todo sistema caótico es *no lineal*. La no linealidad es una exigencia para que aparezca el caos (Lorenz, 1993), pudiendo afirmarse que el caos es un tipo de comportamiento no lineal o una manifestación cuando menos interesante de ésta (Feigenbaum, 1991). Ahora bien, la no linealidad es una condición necesaria pero no suficiente. Es decir, es cierto que toda dinámica caótica es una dinámica no lineal, pero no lo contrario; luego no toda dinámica no lineal es caótica. Hemos visto ejemplos de ello cuando exponíamos diferentes formulaciones de la ecuación logística (ver apartado 3.2.3.1.- Modelos matemáticos sencillos que generan dinámicas complejas). Para obtener caos se hace necesario unas tasas de no linealidad que abran las puertas al inicio de la cascada de bifurcaciones.

Segundo, el caos tiene un marcado carácter *dinámico*. Casi suena a perogrullo. El caos pone un claro énfasis en los aspectos dinámicos del sistema, engarzando y revitalizando la teoría de la iteración. El caos cuenta con mecanismos de realimentación, bien positivos bien negativos, que son la otra condición para su génesis. En efecto, podríamos decir que para generar caos hace falta inestabilidad y realimentación (Simó, 1991). La inestabilidad la conseguimos con unas elevadas tasas de no linealidad. La realimentación, al iteracionar los modelos de simulación. En la naturaleza, la realimentación se produce de manera continua, suponiendo la absorción en tiempo real de lo que acaba de ocurrir.

Tercero, y se trata de una característica definitoria del caos, las dinámicas caóticas muestran *sensibilidad a las condiciones iniciales*. Ya lo sabemos, los sistemas caóticos son extremadamente sensibles a las condiciones de las que parten. En un sistema con dinámica caótica, las trayectorias de dos puntos tan cercanos como se quiera acaban divergiendo rápidamente. Es el efecto mariposa apuntado por Lorenz.

El efecto mariposa tiene una doble lectura pensando en la generación de modelos científicos. Uno, establece límites a la capacidad de predicción del modelos. Fijémonos que esto afecta al hecho mismo de cómo hacer ciencia. En la ciencia clásica es habitual remarcar la importancia de la predicción válida como prueba de una buena construcción teórica. Ahora bien, si los fenómenos son caóticos las predicciones a largo plazo resultan imposibles. El proceso de verificación científica debe ser entonces otro, y debe basarse en propiedades estadísticas y geométricas antes que en la predicción. Y dos, el caos nos muestra que fenómenos que se han considerado aleatorios pueden que sean más predecibles de lo que inicialmente se había pensado (Crutchfield, et al., 1987).

Debido a la existencia del efecto mariposa, determinismo y predecibilidad dejan de ir juntos. Y es que, en los sistemas caóticos, pese a ser estrictamente deterministas por cuando vienen generados por unas reglas que no encierran en sí mismas ningún elemento de azar, el comportamiento es impredecible al cabo de un breve tiempo. Las pequeñas incertidumbres se agrandan hasta dominar el sistema (recordar la explicación que Robert Shaw ofreció a este hecho basado en la ligazón entre micro y macroescalas).

Cuarto, el caos viene *producido por ecuaciones deterministas sencillas* (e. g. Jou y Llebot, 1989; Haken y Wunderlin, 1990). Así es al menos en los modelos de simulación que dan lugar a comportamientos caóticos, tales como el sistema de ecuaciones de Lorenz, la ecuación logística, o las ecuaciones del atractor de Rössler (Rössler, 1976), por citar algunos de los más destacados. Y también es el caso de los sistemas naturales en los que se ha encontrado caos, en todos los cuales ha podido observarse que la dinámica venía regida por un conjunto finito y reducido de variables, hecho que quedaba reflejado en su baja dimensionalidad.

El que ecuaciones sencillas generen tanta complejidad constituye un nuevo aspecto epistemológicamente revolucionario. Retomaremos este tema en los apartados dedicados a la ciencia de la complejidad, baste ahora con apuntar que el caos nos muestra que la complejidad no tiene nada que ver con el número (por ejemplo, una gran cantidad de variables) y sí mucho con el tipo de relación que se da entre esas variables (relaciones caóticas, no lineales). Por otra parte, también es relevante señalar que en el caos la complejidad es intrínseca del propio sistema, sin necesidad alguna de recurrir a influencias de un medio exterior que también pueda ser complejo.

Finalmente, es harto característico del caos la *mezcla de orden y desorden a un mismo tiempo*. Orden y desorden que se confunden a través de las escalas y cuya estructuración aparece visible en la invarianza escalar que presentan los atractores extraños, visible en las estructuras fractales que los procesos caóticos generan. Como ya se ha visto, los atractores extraños representan un claro patrón de orden (de hecho, están confinados en una porción determinada del espacio de fases). Pero, y también lo hemos visto, se trata de un orden emergente y que recoge inestabilidad e impredecibilidad. Podría decirse, que en las dinámicas caóticas los componentes individuales muestran claros rasgos de desorden (como, el desorden molecular, como el aleatorio comportamiento de una hormiga tomada como individuo aislado, etcétera), mientras que en el nivel de las macroescalas se produce la emergencia de un orden, fenómeno autoorganizativo prototipo de los sistemas biológicos (como la conducta emergente y organizada de todo el hormiguero).

Estas son las características básicas del caos. En los dos siguientes apartados desarrollaremos los caminos que nos llevan hacia él y su caracterización métrica.

3.3.2.- Rutas hacia el Caos.

El gran escenario que conduce al caos es la duplicación de períodos estudiada por Feigenbaum, aunque podríamos considerar otras dos rutas derivadas de ésta más genérica: las intermitencias y la cuasiperiodicidad (Eckmann, 1981; Bergé, et al., 1984; Dubois, et al., 1987; Schuster, 1988; Ding, et al., 1991).

Ya hemos visto como la *cascada de duplicación de períodos* en funciones no lineales y recursivas genera una sucesión de bifurcaciones que acaban en caos (ver 3.2.3.- Estudios con la ecuación logística y Teoría de las Bifurcaciones). Al ir aumentando la tasa de no-linealidad, el régimen estable pasa por sucesivas bifurcaciones en su comportamiento dando lugar a la aparición de regímenes periódicos de dos, cuatro, ocho, etcétera, ciclos. Los umbrales de aparición de estas duplicaciones se hallan cada vez más próximos, de tal forma que llega un momento en el que la duplicación del nuevo período alcanza un valor tan elevado que acaba por cubrir todos los comportamientos posibles del sistema. Es el caos.

Otra posible ruta conducente al caos lo constituye las *intermitencias* (Bergé, Dubois, Manneville y Pomeau, 1980; Pomeau y Manneville, 1980; Kadanoff, 1983; Schuster, 1984). Las intermitencias suponen la aparición súbita de inestabilidades en una dinámica que se ha mostrado como estable durante un período largo de tiempo. De esta forma, aparece un corto acceso caótico para luego dar lugar nuevamente a la aparición de nuevos regímenes periódicos, una nueva intermitencia. Este escenario ha sido encontrado en numerosos estudios experimentales (e. g. Schuster, 1984, cita el estudio del ruido electrónico 1/f, Bergé, Dubois, Manneville y Pomeau, 1980, en su trabajo con la convección de Raleygh-Bénard, o también Rasmussen, et al., 1987, en un trabajo con redes de genes).

Por último, una nueva ruta hacia el caos se nos presenta mediante la *cuasiperiodicidad*, tratándose también de un derivado de la duplicación de períodos. Por aumento de un parámetro de control, el régimen periódico comienza a sufrir la cascada de bifurcaciones y, tras hallarse en un régimen biperiódico, ocurre que la dinámica pierde repentinamente su estabilidad y se vuelve caótica. Tal hecho es posible con la aparición de una tercera frecuencia (Ruelle y Takens, 1971, 1980; Fauve, 1982; Schuster, 1984; Dubois, et al., 1987; Haken y Wunderlin, 1990; Ruelle, 1991). De otro modo, basta la influencia de una tercera variable para que una dinámica cuasiperiódica pueda ingresar en el caos.

3.3.3.- Medidas del Caos.

3.3.3.1.- Exponentes de Lyapunov.

Utilizados en topología para medir los efectos antagónicos de estirar, contraer y plegar, los exponentes de Lyapunov proporciona una métrica de la rapidez con la que aumenta o disminuye una perturbación en un sistema dinámico (Markus, 1995). Para nuestros intereses de caracterización de una dinámica como caótica o no, los exponentes de Lyapunov proporcionan una medida de la divergencia de trayectorias. De otra forma, supone una medida de la dependencia sensible a las condiciones iniciales. Así, exponentes de Lyapunov negativos dan cuenta del efecto topológico de contracción mientras que exponentes positivos dan cuenta del efecto contrario, el de estirado (Packard, et al., 1980; Froehling, et al., 1981; Ruelle, 1989).

De este modo en atractores de punto fijo todos los exponentes de Lyapunov son negativos (existe un exponente de Lyapunov por cada dimensión del espacio de fases). El sistema se contrae hasta alcanzar un sólo estado. Cuando el sistema obedece a dinámicas periódicas, el atractor presenta un exponente de cero exacto y todos los demás resultan negativos. Finalmente en dinámicas caóticas el atractor extraño presenta, al menos, un exponente de Lyapunov positivo. De esta forma existe al menos una dimensión del espacio de fases en la cual las trayectorias divergen estirándose y separándose entre sí, una dimensión en la que la perturbación aumenta con el paso del tiempo.

Por otra parte, la divergencia de trayectorias tiene su incidencia en la capacidad de predicción del sistema (Jou, 1995). Mientras más divergentes sean las trayectorias, mientras mayores sean los exponentes de Lyapunov, menor será el tiempo para el que la predicción será aceptable.

Los exponentes de Lyapunov son posibles de calcular, de manera directa, una vez que conozcamos la función que describe la dinámica del sistema. Aunque también se han propuesto métodos para estimar los exponentes de Lyapunov desconociendo las leyes de la dinámica y contando sólo con la información que nos ofrece una serie temporal de una de las variables pertenecientes a la dinámica. Por ejemplo, Wolf et al. (1985) proponen un algoritmo basado en la siguiente idea. Fijándonos en un determinado entorno alrededor de un punto dentro del espacio de fases, podremos apreciar como esta esfera n-dimensional va deformándose a lo largo de las iteraciones. En unas direcciones del espacio de fases puede comprimirse, en otras estirarse, o permanecer igual. Nos fijaremos en la dirección en la cual el estiramiento sea mayor. Ahora sólo basta con mesurar como va cambiando el radio de la esfera con las iteraciones. Esto nos dará una aproximación del exponente de Lyapunov mayor. Si éste tiene un valor positivo, estaremos ante un sistema caótico.

De manera reciente también se han propuesto métodos para dar cuenta del carácter caótico de una dinámica que no precisan de series temporales largas, tipo de series que no son siempre fáciles de obtener. Por ejemplo, Sugihara y May (1990) proponen un método basado en la predicción no lineal para diferenciar entre series temporales debidas al azar o series con dinámicas deterministas (caóticas). Su planteamiento es muy intuitivo. Tomando la serie cronológica, la podemos dividir en dos partes, considerando la primera como conocida y la segunda como un futuro que podemos suponer desconocido. Ahora, utilizamos la primera parte de la serie para realizar predicciones a corto plazo de la segunda parte de la serie. Estas previsiones son comparadas con los datos reales que conocemos de la dinámica (la segunda parte de la serie). En concreto, utilizan la correlación entre valores predichos y la segunda parte de la serie. Las correlaciones constituyen una medida de la precisión de las previsiones.

Los resultados de Sugihara y May demuestran que para ejemplos de series caóticas, la correlación es grande para predicciones cortas en el tiempo, pero estas predicciones decaen estrepitosamente a medida que nos preguntamos por un futuro más lejano. Por el contrario, para series generadas al azar la correlación se comporta de un modo distinto: es completamente independiente del momento temporal que tomemos para predecir, es decir, se obtiene el mismo nivel de confianza de las predicciones a corto y a largo plazo. Tenemos, por tanto, una técnica que sin necesidad de disponer de series largas y sin calcular el exponente de Lyapunov nos indica la presencia de caos.

3.3.3.2.- Entropía de Kolmogorov.

El horizonte finito en la predecibilidad que impone la sensibilidad a las condiciones iniciales puede ser interpretado como una pérdida de información a medida que pasa el tiempo (Jou, 1995). Así, la suma de los exponentes de Lyapunov positivos nos facilita el ritmo de pérdida de información del sistema por unidad de tiempo, magnitud conocida como *entropía de Kolmogorov*. Por otro lado, la entropía de Kolmogorov al ser una medida de la pérdida de información, puede también concebirse como una medida de producción de entropía (Ruelle, 1989; Ding, et al., 1997).

Podemos hablar también de la *entropía del movimiento* o el promedio del ritmo de estirado y plegado, o bien, el promedio de la tasa con que se crea información (Crutchfield, et al., 1987). Para comportamientos periódicos basta con conocer la evolución anterior de la dinámica para poder predecir el futuro de la misma. No hay sorpresas, no hay nuevas informaciones proporcionadas por la evolución del sistema. La entropía es, en este caso, nula. En cambio, para dinámicas caóticas el conocimiento de la evolución pasada no permite la predicción segura, de tal forma que, cada nueva medida aporta una nueva información. En este sentido la técnica antes expuesta de Sugihara y May nos proporcionará una medida de esta entropía de movimiento tomando como medida el decrecimiento brusco de los valores de las correlaciones entre los valores predichos y los valores reales.

3.3.3.3.- Dimensión del Atractor.

La dimensión del atractor es su dimensión fractal, siendo por ello una dimensión fraccionaria. En primer lugar, el que la dimensión del atractor sea finita nos indica que las irregularidades de la dinámica no obedecen a un fenómeno estocástico, sino que son el resultado de una dinámica determinista explicable por un número reducido de variables. Por ello, la dimensión del atractor nos indica el número mínimo de variables necesarias para describir la dinámica del sistema (Froehling, et al., 1981; Farmer, et al., 1983; Dubois, et al., 1987; Ruelle, 1989; Jou, 1995), eso sí, nada nos dice acerca de cuáles podrán ser estas variables.

Para la obtención de la dimensión del atractor se precisa de un número considerable de datos, de una serie temporal muy larga si empleamos el método de reconstrucción del atractor empleado por Takens. En 1983 Grassberger y Procaccia proponen un método que calcula una cuota inferior de la dimensión del atractor solventando el anterior problema. La *dimensión de correlación*, como la llaman los autores, nos facilitará, al igual que la dimensión fractal, el número de variables que están determinando la dinámica. En la práctica, para calcular la dimensión de correlación se elige al azar un punto perteneciente a la dinámica y sobre él se marca una esfera de radio *r*. A continuación se cuenta en número de puntos que se encuentran dentro de la esfera y se estudia como varía este número en función del radio *r* de la esfera. Así, para una distribución uniforme de puntos en un volumen (objeto de tres dimensiones), el número de puntos varía como r^3. En general, se encuentra que los exponentes de *r* son lo valores de las dimensiones necesarias para describir la dinámica. Para dinámicas caóticas se encuentran formulaciones del tipo r^n, donde *n* es un número no entero. Para asegurarse de la presencia de una dinámica caótica, podemos repetir el mismo procedimiento partiendo de otro punto y esfera iniciadora. El resultado ha de ser el mismo.

3.4.- Ciencia de la Complejidad.

En los puntos precedentes hemos explorado la ruta que nos ha llevado desde sistemas ordenados a sistemas caóticos. Pero las teorías del caos no se han detenido ahí y han seguido propiciando nuevos desarrollos.

En este sentido, en las dos últimas décadas la principal aportación realizada ha tenido que ver con la profundización en la relación entre el caos, la información y los procesos de carácter auto-organizativo. La idea de fondo es tan sencilla como atractiva: *los sistemas complejos, con capacidades adaptativas a su entorno, necesitan del caos por cuanto no son posibles ni bajo las estrictas condiciones que impone el paradigma del orden newtoniano ni tampoco bajo la óptica de la plena aleatoriedad en donde cualquier cosa puede ocurrir con igual probabilidad.*

Dos teorías son especialmente relevantes para enfatizar esta idea. Primera la *teoría de la vida en el borde del caos*, desarrollada por un conjunto de científicos americanos pertenecientes al Instituto de Santa Fe (especialmente Chris Langton y

Stuart Kauffman) interesados por la vida artificial y por los fenómenos autoorganizativos. Y segunda la *teoría de los sistemas alejados del equilibrio* elaborada por Ilya Prigogine, químico de origen ruso pero instalado en Bruselas, también interesado por los fenómenos de autoorganización.

De alguna forma ambas teorías nos conducirán por un camino de exploración distinto al visto hasta aquí. Ahora nos adentraremos en la ruta que conduce del caos al orden. Implícitamente, en todo este nuevo desarrollo nos encontraremos con dos preguntas: ¿por qué hay orden y estructura en el mundo que percibimos?, y ¿de dónde procede este orden y estructura? (Waldrop, 1992). Y el reto será presentar con claridad ambas respuestas. También con ello daremos pie a intercambiar el vocablo de caos por el de complejidad, término con muchas resonancias en un sin fin de disciplinas pero del que apenas se han aportado desarrollos ni teóricos ni experimentales interesantes.

Desarrollaremos a continuación una caracterización de la complejidad en la que el caos será uno de sus elementos posibles o propiedades constituyentes. En este sentido recogeremos los trabajos en epistemología de Frederic Munné. También desde la epistemología veremos la aportación de Edgar Morin y los diferentes tipos de complejidad que propone. De todo ello, nos deberán quedar con suficiente claridad las relaciones existentes entre el caos y la complejidad así como las diferencias entre lo complejo, lo complicado y el concepto de totalidad.

Concluiremos con la exposición de la teoría de los sistemas autopoiéticos de Maturana y Varela (1973), teoría que realiza una interesante aportación para entender el fenómeno auto-organizativo, característica esencial de las formas vivas.

Al finalizar, se nos habrá presentado de manera clara la naturaleza cualitativa de la complejidad. Nos desprenderemos de la habitual visión de ésta como una cuestión de número, de muchos elementos a considerar, y nos centraremos más en los aspectos de relación entre partes del sistema que queremos caracterizar como complejo. También nos daremos cuenta de la falsedad de una presunción muy clásica: la complejidad sólo puede ser el resultado de causas complejas (Lewin, 1992; Waldrop, 1992). Las teorías de la complejidad nos muestran que "*la complejidad que vemos en el mundo es el resultado de una simplicidad subyacente*" (Langton, entrevista con Lewin, 1992, págs. 223-224), o de otra forma, "*la conducta compleja no necesita tener raíces complejas*" (Langton, entrevista con Waldrop, 1992; pág. 279) y, con ello "*tenemos la posibilidad de describir modelos simples que expliquen la creatividad que vemos*" (Langton, entrevista con Lewin, 1992, págs. 223-224).

3.4.1.- Vida en el borde del caos.

Chris Langton, especialista en vida artificial del Instituto de Santa Fe en Nuevo México, y Norman Packard, físico de Santa Cruz darán un nuevo paso en la relación entre las teorías del caos y la teoría de la información. Mediante estudios con autómatas celulares han encontrado como estos micromundos existentes en el ordenador evolucionan de manera automática hacia un punto crítico, a medio camino entre el orden y el desorden, en el que la capacidad de procesamiento de información se maximiza.

Langton recogerá los trabajos de Stephen Wolfram sobre autómatas celulares y clases universales de éstos. En concreto, este autor había propuesto cuatro clases universales de comportamiento de dichos autómatas (Wolfram, 1986). Dichos comportamientos, como se verá, son similares a los ya descritos por la teoría de los atractores. Así, en la Clase I los autómatas celulares acababan extinguiéndose todos y la pantalla del ordenador adquiría un claro tono monocromático. De otra forma, la dinámica de los autómatas estaba regida por un atractor de punto fijo. En la Clase II el comportamiento de los autómatas oscilaba periódicamente por una serie de estados concretos. Es decir, la dinámica presentaba un atractor periódico o de ciclo límite. En la Clase III el comportamiento de los autómatas era totalmente aleatorio, dándose una extrema actividad en la pantalla del ordenador. Tan pronto se destruían autómatas como se creaban otros nuevos con absoluta impredecibilidad y dando lugar a una dinámica totalmente inestable. La Clase III se correspondería con la dinámica aleatoria, dinámica que carecería de atractor alguno. Finalmente, estaba la Clase IV en donde los autómatas mostraban dinámicas también complejas pero ahora estables, donde los autómatas presentaban estructuras coherentes, estructuras que incluso se combinaban entre sí para generar autómatas más complejos. La Clase IV se correspondería con la presencia de atractores extraños. Es en la Clase IV en donde los autómatas celulares optimizan el manejo de la información tal y como luego demostrarían Langton y Packard, donde los autómatas adquieren capacidades emergentes tales como la capacidad de autorreproducción.

Langton y Packard pondrán de manifiesto que en dichos autómatas celulares la capacidad para almacenar y procesar información (capacidad computacional) alcanza su valor máximo en un estrecho régimen situado entre el comportamiento periódico y el comportamiento plenamente aleatorio, de otra forma, cuando los autómatas pertenecen a la Clase IV de Wolfram (Langton, 1990; Lewin, 1992). Langton (1986) llamará a este punto ‘el arranque del caos’ (en inglés *onset of chaos*), Packard (1988) por su parte lo denominará ‘el borde del caos’ (*at the edge of chaos*), siendo está última la expresión que se ha hecho más popular. Aunque, la expresión no es del todo correcta. La expresión original inglesa ‘at the edge of chaos’ bien puede traducirse como ‘en el borde’, ‘en el límite’ o ‘en el filo’ del caos. La primera ha sido la más habitual. Si decimos que hay un error, es en la propia expresión. Nada tiene que ver con la traducción.

En efecto, la Clase IV de Wolfram recoge una dinámica de los autómatas a medio camino entre el orden y la aleatoriedad, es decir, cuando el comportamiento es caótico. Luego la expresión ‘en el borde’ no es del todo correcta ya que se está haciendo referencia a un estado propiamente caótico, no cercano a éste (el propio Waldrop cae en esta confusión al equiparar la Clase III de Wolfram con el caos y la Clase IV con un nuevo tipo de dinámica). De hecho, y a favor de lo que estamos argumentando, se han encontrado fractales en la configuración de dichos autómatas.

Por ello, y en este sentido, la expresión empleada originariamente por Langton 'el arranque del caos' se muestra más certera. Otro asunto es que con la expresión 'at the edge of chaos' se pretenda recoger lo peculiar de dicho régimen en tanto a su finura, a su característica de régimen estrecho en el que se maximiza la capacidad computacional conviviendo orden y desorden. Con ese propósito sí que la traducción 'en el filo' se mostraría como la más adecuada. El borde, el filo, del caos como ese estrecho régimen en el que los sistemas mantienen un comportamiento que no cae ni en la repetición permanente ni tampoco se disuelven en la plena turbulencia (Waldrop, 1992).

El descubrimiento de que el procesamiento de la información se maximiza en los estados caóticos fue importante en sí mismo (Lewin, 1992). Podemos concebir el caos como una región intermedia entre el orden absoluto, característico de la mecánica clásica, de la física newtoniana, y el azar completo. El caos se produce en un punto intermedio. De alguna forma, *los sistemas biológicos no pueden existir ni en situaciones continuamente repetitivas y estables, ni en la región caracterizada por la plena aleatoriedad*. En el primer caso porque la vida necesita de desequilibrios, de la flexibilidad que proporciona un cierto desorden (nos quedará claro cuando veamos la teoría de los sistemas alejados del equilibrio). Las estructuras que se generan en estas circunstancias son demasiado estáticas. Y en el segundo por una simple razón de estructura, de organización. No hay estructura alguna posible en el azar. Un cierto orden se hace necesario para almacenar información, para mantener cierta estabilidad estructural (Langton, 1986; Lewin, 1992; Solé, et al., 1996). En definitiva, las teorías del caos tratan sobre la estructura y el orden. Pero un orden muy distinto al característico de la mecánica clásica, reflejado en el paradigmático ejemplo de la dinámica celeste.

La teoría de la vida en el borde del caos recibirá diferentes respaldos. En primer lugar, por el bioquímico y biofísico Stuart Kauffman, del propio Instituto de Santa Fe, en sus trabajos con redes boolenas aleatorias y sus hallazgos sobre la autoorganización. En segundo lugar, Per Bak y Kan Chen del Laboratorio Nacional de Brookhaven, han propuesto la teoría de la criticalidad autoorganizada que proporciona un modelo paradigmático de cómo los sistemas buscan dicho estado crítico ejemplificado en un simple montón de arena. Lo veremos a continuación. Finalmente, también podríamos mencionar a la teoría de los sistemas alejados del equilibrio, aunque su desarrollo es anterior a la teoría de la vida en el borde del caos de Langton y Packard. La teoría de los sistemas alejados del equilibrio, elaborada en numerosos trabajos por el premio Nobel de química Ilya Prigogine, de la Universidad Libre de Bruselas, constituye toda una teoría integradora de estudio de los sistemas complejos, sistemas en los que aparecen propiedades auto-organizativas y de los que daremos cuenta detallada en un punto posterior (ver apartado 3.4.2.- Teoría de los Sistemas Alejados del Equilibrio). Veamos ahora las aportaciones de Kauffman y Bak y Chen.

Stuart Kauffman (1992, 1993) trabaja con redes booleanas aleatorias del tipo NK, especie de redes neuronales en la que los elementos se encuentran relacionados entre sí de una manera aleatoria, siendo N el número de elementos de la red y K el número de conexiones por elemento. En una red booleana cada variable está regulada por otras que operan sobre ella como señales de entrada. Las variables son binarias, pudiendo presentar dos estados, bien activada bien desactivada. El comportamiento dinámico de cada variable, es decir, en cuál de sus dos estados posibles se va a encontrar en el instante siguiente, está gobernado por las funciones booleanas o reglas lógicas de conmutación del tipo 'O' e 'Y'. Así, con la función booleana 'O', la variable se encuentra activada cuando lo está al menos una de las variables de entrada que se relacionan con ella. Y con la función booleana 'Y', la variable está activada cuando lo están todas las variables de entrada también lo están. Las redes booleanas aleatorias le sirven a Kauffman para modelar matemáticamente sistemas biológicos autónomos en los que ninguna señal proviene del exterior.

La red procede a través de una serie de estados. En un momento, cada elemento de la red examina las señales que le llegan de las relaciones que mantiene con otros elementos y se activa o desactiva según sus reglas para reaccionar a ellas. Después, la red alcanza el siguiente estado, donde el proceso se repite otra vez. En estas redes, Kauffman encuentra un resultado aparentemente contraintuitivo: a pesar de mantener entre sí relaciones puramente aleatorias, con el tiempo, la red acaba estabilizándose en una serie de estados en los que se congela su comportamiento, de otra forma, encuentra la generación de un orden espontáneo, de un fenómeno *auto-organizativo*, como un producto inevitable de la dinámica de un sistema masivamente desordenado (Kauffman, 1992, 1993).

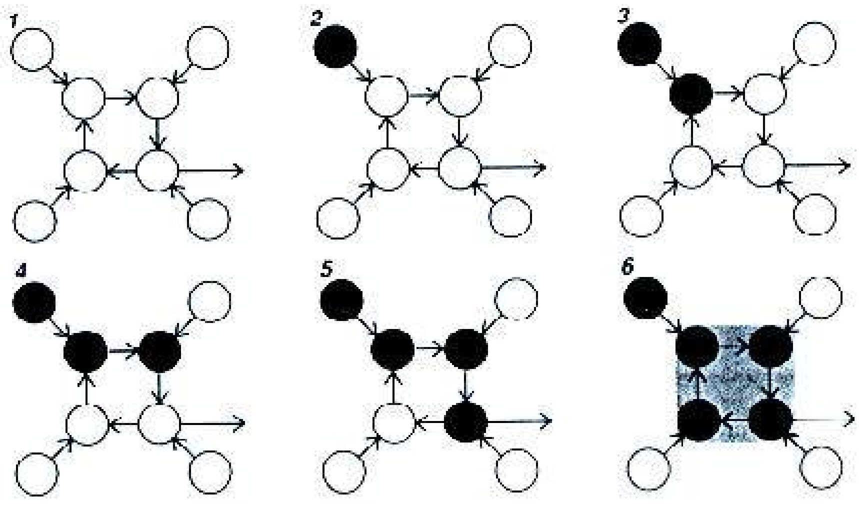


Figura 25: Ilustración de una red booleana de las trabajadas por S. Kauffman y el funcionamiento de la misma. En este caso, todos los elementos están gobernados por funciones booleanas del tipo 'O' e inicialmente se encuentran desactivados. Al activar uno de los elementos o variables del sistema (en negro) el sistema experimenta una cascada de cambios. Como consecuencia de la configuración de la red y del tipo de funciones booleanas en ella presentes, la red acaba presentando una cierta configuración de elementos congelados en estado activo a cuyo estado retornarán aun cuando se alteren ellos o alguna de sus entradas. (Ilustración tomada de Kauffman, 1992, pág. 49).

La aparición de un orden emergente ocurre cuando la red tiene un número determinado de conexiones con otros elementos. De este modo, cuando la red tiene sólo una conexión por elemento (K=1), la red acaba congelada al completo y en ella no aparece configuración alguna de estados. También cuando la red cuenta con cuatro o más conexiones por elemento (K$4), el sistema es inestable y la red completamente aleatoria no se estabiliza en ningún momento. Es cuando la red cuenta con dos conexiones por elemento (K=2) cuando se genera un número pequeño de atractores en la red, cuando cristaliza un orden emergente. El número de atractores obedece a una regla numérica: ronda en torno a la raíz cuadrada del número de elementos de la red. Además, con K=2, la red describe una extrema sensibilidad a las condiciones de partida. El pequeño número de atractores, *el fenómeno de autoorganización aparece en el borde del caos en las redes booleanas aleatorias.*

En la emergencia de este orden espontáneo, de este fenómeno de anticaos[6] como el autor lo denomina, Stuart Kauffman ve una explicación alternativa a la selección natural darwiniana en la génesis de las formas biológicas, del orden en biología. La hipótesis de la selección natural pasa a ser una explicación no necesaria y que sólo entraría en juego en el posterior éxito adaptativo de la forma, nunca en su formación. De este modo, el proceso evolutivo podría entenderse como un compromiso transaccional entre la selección y la autoorganización (Kauffman, 1992, 1993, 1995; Goodwin, 1994, 1998). El orden biológico emerge de manera natural desde las leyes de la física y la química. La organización biológica emerge espontáneamente desde el caos molecular y se manifiesta así mismo como un sistema que crece (Waldrop, 1992).

Un nuevo apoyo de la teoría del borde del caos vendrá de la mano de la *teoría de la criticalidad autoorganizada* de Per Bak y Kan Chen (1991), pertenecientes al Laboratorio Nacional de Brookhaven en Nueva York. Para Bak y Chen, los grandes sistemas interactivos se auto-organizan de tal forman que llegan a un estado crítico en el que un acontecimiento banal puede dar lugar a reacciones en cadena capaces de producir auténticas catástrofes. Tomando como modelo un montón de arena, Bak y Chen proponen que el montón de arena se auto-organiza en un estado crítico tal que la añadidura de un nuevo grano de arena puede provocar avalanchas catastróficas. Aunque la mayoría de las veces el grano se sumará al montón sin producir avalancha alguna. En este sentido, aparece una ley potencial: la probabilidad que se produzca una avalancha es inversamente proporcional al tamaño de ésta, así las avalanchas pequeñas son más frecuentes que las avalanchas grandes.

Para los intereses de la teoría de la vida en el borde del caos, lo realmente significativo es que *la pila de arena crece hasta alcanzar un estado crítico en el*

[6] El término anticaos hay que entenderlo como un intento de Kauffman, y del Instituto de Santa Fe al que pertenece, de diferenciarse de otras aportaciones realizadas dentro de las teorías del caos, obedeciendo a una clara pugna académica. De hecho en el Instituto de Santa Fe se ha puesto mucho interés por diferenciar la complejidad del caos (ver por ejemplo Waldrop, 1992 u Horgan, 1995) y, es cierto que son cosas distintas (ver para más detalles apartado 3.4.3.- Caracterización de la Complejidad). Pero de ahí a considerar la complejidad como un fenómeno de anti-caos hay algo más que una mera intención de distinción terminológica.

que se hacen posible fenómenos catastróficos. Además, el montón de arena nos sirve de paradigma de sistema en el borde del caos. De un lado, el sistema es inestable en muchos puntos locales como lo demuestra la existencia de las avalanchas. Del otro, el estado crítico alcanzado es robusto, es decir, constituye un auténtico estado atractor de las configuraciones posibles del montón de arena.

La teoría de la criticalidad autoorganizada ha logrado explicar la evolución sísmica de la corteza terrestre, retomando hallazgos anteriores que apuntaban a que la distribución de los epicentros de terremotos está descrita por fractales (Scholz, 1982).

3.4.2.- Teoría de los Sistemas Alejados del Equilibrio.

3.4.2.1.- Sistemas En, Cerca y Alejados del Equilibrio.

En el capítulo 2 sobre Teoría de Sistemas y Teoría Organizativa y cuando exponíamos la extensión de Prigogine a la segunda ley de la termodinámica hemos dejado por desarrollar un concepto, el de equilibrio, y una clasificatoria de sistemas en torno a él, sistemas en equilibrio, sistemas cerca del equilibrio, y sistemas alejados del equilibrio. Ya hemos apuntado que los sistemas abiertos pueden existir en tres tipos diferentes de estados según su posición de equilibrio. En lo que sigue, nos basaremos en algunos de los trabajos más relevantes de Ilya Prigogine (Glansdorff y Prigogine, 1971; Nicolis y Prigogine, 1977; Prigogine, 1983, 1986, 1988, 1993, 1997; Nicolis y Prigogine, 1987; Prigogine y Stengers, 1979) en los que se trata el estudio del equilibrio con relación a cómo en función de la distancia del sistema con respecto al mismo, en-cerca-lejos, aparecen propiedades muy diferentes.

Tomemos una definición sencilla de equilibrio: *el equilibrio es el estado de máxima entropía* (Prigogine y Stengers, 1979). Dicha definición corresponde a un tipo de equilibrio que podríamos denominar *equilibrio termodinámico*, diferente de otro tipo de equilibrio, *equilibrio mecánico*, que podríamos definir como “un estado especial en el que tanto las velocidades como las aceleraciones de todas las masas puntuales son iguales a cero” (Nicolis y Prigogine, 1987, pág. 83).

Consideremos un ejemplo de este equilibrio termodinámico, en adelante en el que nos vamos a centrar. Imaginemos dos recipientes conectados en los que tenemos nitrógeno, en uno de los recipientes, e hidrógeno, en el otro. La segunda ley actúa y, con el tiempo, ambos gases acabarán mezclados, remitiendo las diferencias de concentración de los recipientes. El sistema alcanza su estado de equilibrio. Se trata de un *sistema en equilibrio,* de un sistema que ha alcanzado su valor máximo de entropía, en el que todos los flujos y fuerzas son nulos, en el que se ha alcanzado un estado de uniformidad. Un cristal, una vez formado, es un típico sistema en equilibrio, el cual ya no necesita de flujo alguno proveniente del medio para mantenerse. Un sistema en equilibrio es un sistema muerto (Jou y Llebot, 1989).

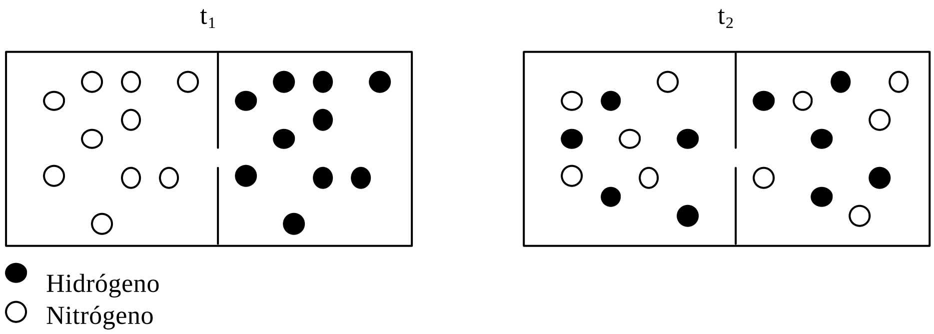


Figura 25: Sistema que evoluciona hacia un estado de equilibrio.

Si calentamos uno de los recipientes de tal forma que mantengamos una ligera diferencia de temperatura entre ambos recipientes, el nitrógeno y el hidrógeno se mezclarán pero no de manera uniforme. Hay más nitrógeno en uno de los recipientes y más hidrógeno en el otro. La diferencia de temperatura ha producido un cierto orden, un estado *cercano al equilibrio*. Los estados cercanos al equilibrio son estados lineales en los que el flujo es una función lineal de la fuerza (en nuestro ejemplo, el intercambio molecular de hidrógeno y nitrógeno es proporcional a la diferencia de temperatura que mantengamos). Son estados en los que la producción de entropía es mínima, siendo ésta compatible con las ligaduras impuestas al sistema, lo que se conoce como el *teorema de producción mínima de entropía*. Además, cualesquiera que sean las condiciones iniciales, el sistema alcanza finalmente el estado cercano al equilibrio que las condiciones le están imponiendo. Las reacciones del sistema son, por ello, perfectamente predecibles. Si aumentamos la diferencia de temperatura obtendremos más pureza en los gases situados en cada uno de los recipientes. Si igualamos las temperaturas, obtendremos una mayor mezcla del hidrógeno y del nitrógeno.

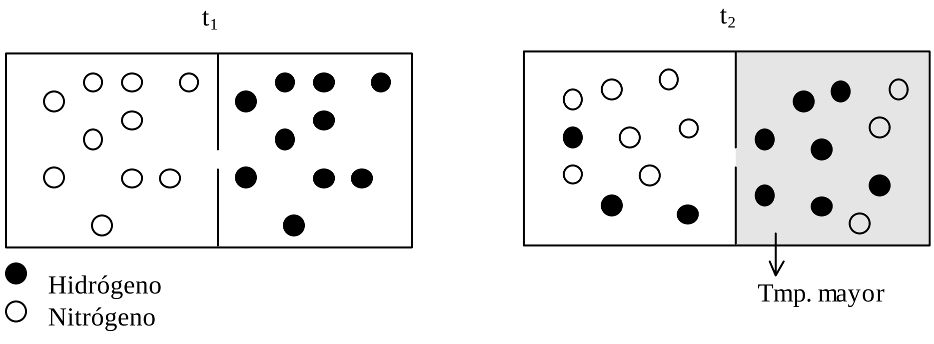


Figura 26: Sistema que acaba en un estado cercano al equilibrio debido a la diferencia de temperaturas mantenidas entre ambas partes del recipiente.

Tanto en los sistemas en equilibrio como en los cercanos al equilibrio podemos describir un estado (el estado de equilibrio, en el primer caso, y el estado de producción mínima de entropía, en el segundo) que actúan como *atractores* del sistema. Igualmente, en ambos casos, la materia cumple con la prescripción probabilista de Bolztman que ya hemos visto. También tienen en común el que el tiempo es reversible. Los cambios son posibles en ambas direcciones temporales. Por ello, es posible la realización de predicciones tanto de momentos futuros como de momentos pasados, dada la reversibilidad de los procesos. Las predicciones en Astrología, tanto hacia atrás en el tiempo -saber cuál fue la estrella avistada por Los Magos de Oriente-, como hacia delante -conocer cuándo se producirá el próximo eclipse de Luna completo- son muy ilustrativas en este sentido.

Hemos hablado de sistemas con mínimos intercambios con su entorno (pequeñas diferencias de temperaturas mantenidas entre los recipientes, por ejemplo), pero, ¿qué ocurre en situaciones en la que el sistema sufre grandes intercambios de energía o de materia con el exterior? En tales casos, nos dice Prigogine que *'el equilibrio no es posible, por darse procesos disipativos que continuamente producen entropía'* (Prigogine y Stengers, 1975, pág. 87). La segunda ley permite prever la evolución del sistema hacia un estado estacionario, cuyas propiedades constituyen una extrapolación de las propiedades del estado de equilibrio: inercia máxima, aunque no total como en el estado de equilibrio, olvido de las condiciones iniciales y desorganización. No obstante, Prigogine descubre que *a partir de cierta distancia del equilibrio, de cierto alejamiento del equilibrio, el orden emerge del caos*. *Traspasado un umbral, no sólo se destruyen los sistemas, sino que también aparecen estructuraciones, emergen sistemas nuevos*. Briggs y Peat (1989) nos ofrecen un excelente ejemplo de ello.

> 'Imaginemos un oleoducto que derrama petróleo en un gran receptáculo en una planta industrial. El petróleo fluye regularmente, formando un hoyuelo al caer en la superficie del petróleo del receptáculo. Supongamos que alguien abre el grifo para que más petróleo circule por el oleoducto. El primer efecto del nuevo chorro de petróleo consiste en una turbulencia mayor, en fluctuaciones. Estas fluctuaciones aumentan aleatoriamente, enfilando aparentemente hacia el caos total hasta que llegan a un punto de bifurcación. Allí, en una intersección crítica, una de las muchas fluctuaciones se amplifica y se propaga, influyendo sobre el sistema y dominándolo. Se forma un patrón de remolinos. El orden ha surgido del caos.' (p. 136).

Consideremos otros dos ejemplos, estudiados en química, de sistemas alejados del equilibrio. El primero de ellos es la popular reacción de Belousov-Zhabotinsky, o reacción BZ, obtenida por azar por el primero de los autores en 1958 y refinada posteriormente por el segundo. La reacción BZ es una típica reacción oscilante (Epstein, Kustin, De Kepper y Orbán, 1990) que se produce al mezclar una serie de componentes químicos (en su versión original ácido malónico, bromato, iones de cerio y ácido sulfúrico) en concentraciones y temperaturas determinadas. Una vez provocada la reacción química, y después de pasar por un período de mezcolanza de componentes, van apareciendo espirales desde el centro hacia afuera que van creciendo y, a su vez, cambiando paulatinamente de un color azulado a un rojizo para volver a ser azulado y así de manera repetida y a intervalos regulares. Igualmente, si se roza la reacción, el punto que se ha tocado se convierte en el origen de otra espiral de anillos que competirá con la que ya existía para abarcar toda la reacción.

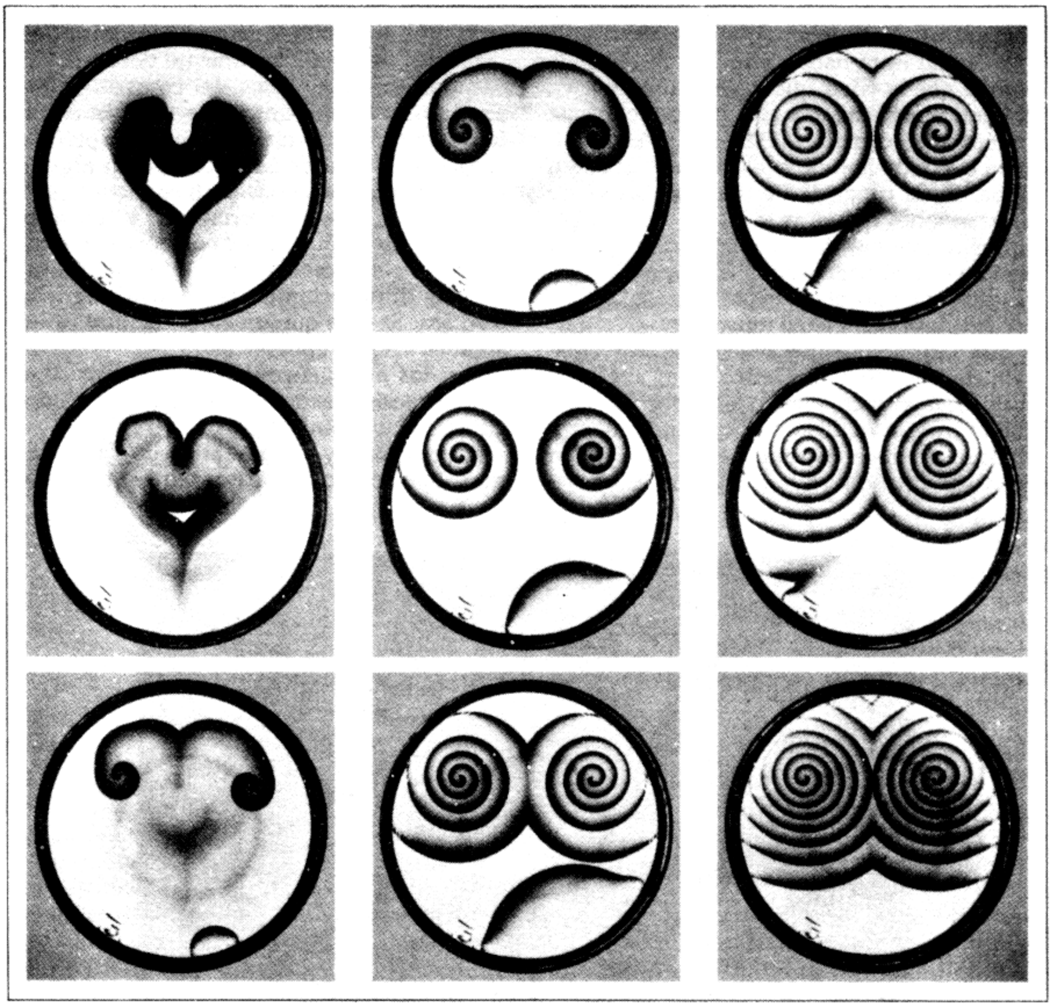


Figura 27: Ejemplo de sistema alejado del equilibrio: reacción de Belousov-Zhabotinsky. La secuencia de imágenes está presentada de arriba e izquierda hacia abajo y derecha. (Imagen extraída de Prigogine, 1980, pág. 200).

Durante mucho tiempo se pensó que dicha reacción violaba las leyes de la naturaleza. Se cuenta la anécdota de que el artículo en el que Belousov exponía dicho hallazgo fue rechazado por el editor de la revista en que debía publicarse por considerar su descubrimiento del todo imposible. En lugar de tender hacia un estado de uniformidad y mezcla entre sus componentes, hacia un estado de equilibrio, aparecían estructuras ordenadas y oscilatorias a modo de un perfecto reloj químico.

Y también durante mucho tiempo se ha visto la reacción BZ como una mera curiosidad. Es sólo hoy, y en el contexto de la formulación prigoginiana de los sistemas alejados del equilibrio, cuando se concibe a la reacción BZ como un claro ejemplo de sistema auto-organizativo, emergente de unas condiciones iniciales peculiares. Condiciones iniciales que son las de mantener al sistema alejado del equilibrio. En palabras de Prigogine, "*el orden se genera a partir del caos a través de condiciones de no equilibrio*" (1982, págs. 32-33). De hecho, y para corroborar empíricamente la afirmación prigoginiana, diversos estudios experimentales (Roux, et al., 1980; Hudson y Mankin, 1981; Pomeau, et al., 1981; Simoyi, Wolf y Swinney, 1982) han hallado el atractor extraño de dicha reacción así como un exponente de Lyapunov positivo propio de los sistemas caóticos.

Un segundo ejemplo prototipo de sistema alejado del equilibrio, y muy trabajado por el propio Prigogine, es la inestabilidad de Bénard. Se consigue al calentar de una manera uniforme desde su parte inferior un recipiente con fluido viscoso, por ejemplo, helio. Conforme se intensifica el calor, y a un determinado nivel de temperatura bien determinado, comienzan a parecer de manera espontánea células de convección con una estructuración muy regular. Esto corresponde a un alto nivel de organización molecular en el que la energía se transfiere desde la agitación térmica a corrientes de convección macroscópicas. Dicha configuración permanece mientras suministremos temperatura al sistema. En cuanto deja de alimentarse, tal estructuración comienza a difuminarse y el sistema alcanza su estado de equilibrio. La inestabilidad de Bénard constituye otro excelente ejemplo, y también a un nivel químico, de cómo, por encima de un valor crítico de temperatura, ciertas fluctuaciones se amplifican y dan origen a corrientes macroscópicas generadoras de un orden molecular. La inestabilidad de Bénard es otro buen ejemplo de que existen estructuras que se generan y se mantienen gracias a los intercambios de energía que mantienen con el mundo externo, en condiciones de inestabilidad, de alejamiento del equilibrio (Prigogine, 1972).

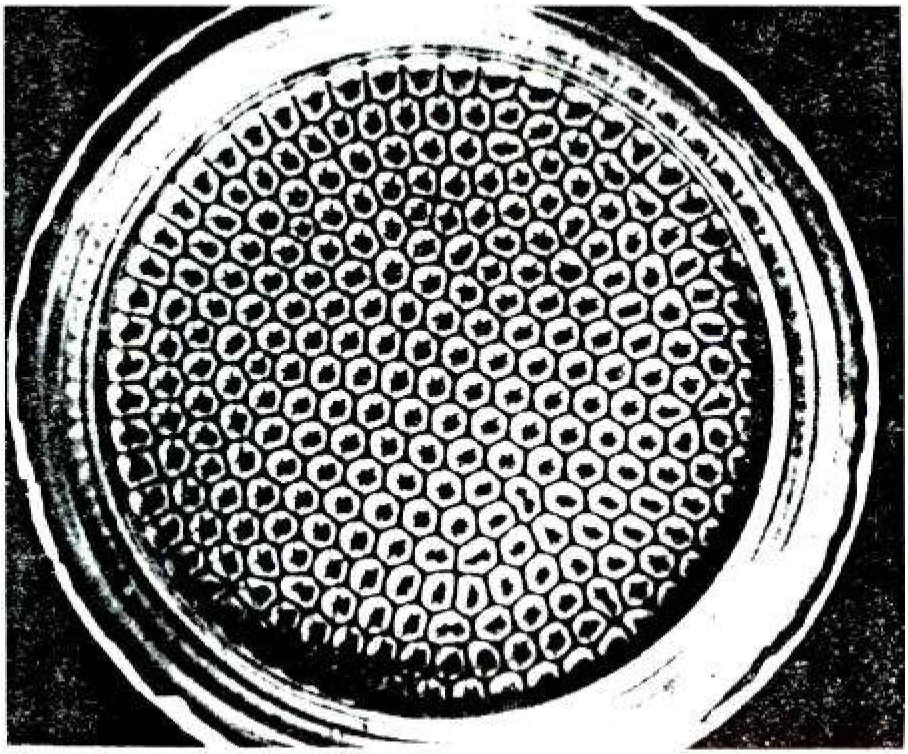


Figura 28: Otro ejemplo de sistema alejado del equilibrio: la inestabilidad de Bénard (imagen fotográfica extraída de Prigogine, 1986, pág. 162).

Todos estos ejemplos han de servirnos para entender que '*en un estado alejado del equilibrio, la materia tiene propiedades radicalmente nuevas*' (Prigogine, entrevista concedida a Briggs y Peat, 1989, pág. 139). A Prigogine le gusta decir que la materia en equilibrio es ciega, mientras que la materia muy alejada del equilibrio detecta minúsculas diferencias, esenciales para la construcción de sistemas altamente coherentes y complejos (1983). Las *fluctuaciones* que en los sistemas en y cerca del equilibrio remitían, dando la existencia de atractores, ahora no sólo pueden eventualmente no remitir, sino que pueden aumentar y arrastrar al sistema hacia nuevas configuraciones. Se produce así un *orden por fluctuaciones*.

Efectivamente, cuando, en vez de desaparecer, una fluctuación aumenta dentro del sistema, más allá de un umbral crítico de estabilidad, el sistema experimenta una transformación, adoptando un modo de funcionamiento distinto, estructurado en el tiempo y en el espacio, funcionalmente organizado. Este proceso de autoorganización conduce hacia lo que Prigogine ha llamado una *estructura disipativa* (Prigogine y Stengers, 1975), denominación que pretende reflejar la aparente contradicción que estas estructuras presentan al disipar de manera constante energía mientras conservan su estructura gracias a las interacciones que mantienen con el medio (Nicolis y Prigogine, 1977).

La estructura disipativa es la fluctuación amplificada y estabilizada por las interacciones con el medio. Contrariamente a las estructuras en equilibrio, por ejemplo un cristal, las estructuras disipativas sólo se mantienen por nutrirse de manera continua con un flujo de energía y de materia, disipando energía e importándola de su medio exterior. Una estructura disipativa no puede existir al margen del mundo externo. Necesita de los aportes continuos de energía y de materia que sostienen los procesos disipativos.

A su vez, las estructuras disipativas también presentan umbrales de inestabilidad, umbrales que si alguna fluctuación atraviesa conducirán a la estructura disipativa hacia una nueva estructuración, hacia un nuevo modo de funcionamiento cualitativamente diferente.

Si hemos hablado del papel de las fluctuaciones en la generación de nuevos órdenes en las estructuras disipativas, también es importante fijar nuestra atención en otro concepto de interés: las *bifurcaciones*. Ya hemos expuesto algunos de los principales aspectos de la teoría de las bifurcaciones cuando desarrollamos los trabajos de May y Feigenbaum con la ecuación logística. Ahora recuperaremos el concepto más clásico de bifurcación en cuanto a un tipo o momento del comportamiento dinámico.

En nuestra descripción de los sistemas alejados del equilibrio hemos hecho mención de umbrales, de distancia crítica de alejamiento del equilibrio, de niveles de temperaturas muy determinados en el caso de la inestabilidad de Bénard, etcétera. Todos ellos constituyen para el sistema puntos de bifurcación. Puntos en los que el sistema ha de elegir qué dirección tomar, qué camino coger. Expresado de este modo pudiese parecer un exceso de antropomorfismo. No es así.

En efecto, en los diferentes ejemplos que hemos ido dando, el punto de bifurcación se hallaba cuando el sistema tiene que elegir entre seguir en el estado de equilibrio o adaptar el nuevo comportamiento de la fluctuación que se va amplificando. Superada una distancia crítica del equilibrio, las ecuaciones que determinan la dinámica del sistema se tornan no lineales. Una característica básica de toda ecuación no lineal es la no-unicidad de su solución. De otro modo, las ecuaciones no lineales tienen más de una solución posible. Las soluciones posibles se bifurcan (lo hemos visto en el trabajo de Robert May), pero el sistema adoptará una de ellas. ¿Cuál? Apuntemos la respuesta: el azar decide (Wagensberg, 1986). Ya conocemos el papel del azar en los sistemas caóticos. Azar recuperado de las escalas microscópicas, que explicaría Robert Shaw. Volveremos sobre ello más adelante.

Tabla 4: Diferencias más significativas entre los diferentes tipos de sistemas según su posición de equilibrio.

Sistemas ...		
En Equilibrio	Cerca del Equilibrio	Alejados del Equilibrio
Uniformidad: sin diferencias de concentración. Los flujos y fuerzas son nulos	Estados lineales: el flujo es función lineal de la fuerza	Estados no lineales
Estados de máxima entropía	Producción de entropía mínima	Continua producción de entropía, dado los continuos intercambios con el medio
Atractor: el estado de máxima entropía	Atractor: el estado de generación de mínima entropía	Sin atractor aparente
Sean cuales sean las condiciones iniciales el sistema evoluciona hacia su estado atractor		Minúsculas diferencias en las condiciones iniciales generan evoluciones distintas
Las fluctuaciones remiten debido a la existencia de los atractores		Las fluctuaciones se amplifican: surge un orden por fluctuaciones: las estructuras disipativas
Los procesos son reversibles		Los procesos son irreversibles (barrera entrópica)
Concepción del tiempo como reversible		Concepción del tiempo como unidireccional. El tiempo tiene una flecha

Como consecuencia de la no-linealidad de los procesos y del papel del azar que rigen la dinámica del sistema, se pierden las condiciones iniciales, por lo que no es posible la inversión temporal. Se da una *barrera entrópica* (Briggs y Peat, 1989) debido a que la inversión temporal de los procesos no es posible pues se precisaría de una cantidad de información infinita para la recuperación de las condiciones iniciales. Hay una incapacidad para retroceder en el tiempo debido a la irreversibilidad de la dinámica. Se dice por ello que el tiempo tiene una flecha (Prigogine, 1988, 1997; Coveney y Highfield, 1990), la cuál apunta en una sola dirección. Nacemos, crecemos, envejecemos y morimos. Esta secuencia, no suele ocurrir en otro orden.

Para finalizar esta presentación de los sistemas alejados del equilibrio, es conveniente remarcar una idea sobre la relación de éstos con la segunda ley de la termodinámica. La existencia de sistemas alejados del equilibrio, y de la evolución que presentan parecería contradecir la segunda ley de la Termodinámica. Ya hemos remarcado que dicha ley es aplicable sólo a sistemas aislados, y no lo es a los sistemas abiertos en los que los cambios de entropía no están únicamente determinados por los procesos irreversibles que en ellos se producen. La segunda ley no es violada por los sistemas alejados del equilibrio y por las estructuras disipativas que de éstos emergen (Laszlo, 1988). Al igual que la gravedad no es violada por la existencia de una luna orbital. Más bien, las estructuras disipativas aprovechan la entropía, al igual que la Luna aprovecha la gravedad para permanecer en su órbita. El orden, no surge a pesar de los procesos disipativos ricos en producción de entropía sino precisamente debido a ellos (Hayles, 1990).

Bien, hasta aquí hemos presentado la clasificatoria prigoginiana de sistemas en-cerca-y alejados del equilibrio. Aunque no haya quedado expresado explícitamente en ningún momento entre los párrafos anteriores, es obvio que tal clasificatoria tiene una estructuración de *continuo*. Y naturalmente tal clasificatoria es aplicable a cualquier sistema.

3.4.2.2.- Características diferenciales entre los Sistemas Alejados del Equilibrio frente a los Sistemas En y Cerca del Equilibrio.

En ayuda de una mejor comprensión de la aportación prigoginiana de los sistemas abiertos alejados del equilibrio, presentaremos algunas de las características diferenciales más relevantes de este tipo de sistemas con relación a los sistemas en y cerca del equilibrio.

En primer lugar, los sistemas en y cerca del equilibrio son sistemas básicamente estables debido a los atractores que rigen sus dinámicas[7], mientras que superada una distancia crítica del equilibrio, *con el alejamiento del equilibrio, los sistemas se tornan inestables*. Superada una distancia crítica del equilibrio, las fluctuaciones pueden eventualmente no remitir y tienden a amplificarse. Los *sistemas estables* son aquellos en los que pequeñas perturbaciones no impiden al sistema retornar a su posición de equilibrio, de estabilidad (por ejemplo, un leve empujón dado al péndulo de un reloj de pared no impide a éste regresar a su oscilación habitual después de un breve tiempo de oscilación turbulenta). Los *sistemas inestables* se caracterizan por el hecho de que las mismas pequeñas perturbaciones pueden

[7] Para ser precisos, hay que decir que los sistemas en y cerca del equilibrio son sistemas estables debido al tipo de atractores que rigen sus dinámicas, atractores del tipo punto fijo y ciclo límite.

precipitar al sistema hacia otros estados (por ejemplo, el pequeño empujón dado en este caso a un lápiz en pie) (J. C. Maxwell, 1876; recogido por Thom, 1980). En los sistemas estables (sistemas en equilibrio o cerca del equilibrio), pequeñas causas producen pequeños efectos. En los sistemas inestables (sistemas alejados del equilibrio), pequeñas causas pueden producir efectos desproporcionados (Prigogine, 1997). Es “el efecto mariposa” ya visto (Lorenz, 1963, 1972).

Por tanto, en los sistemas alejados del equilibrio hay una desproporcionalidad, no-linealidad, entre las causas y los efectos. Los sistemas alejados del equilibrio son, por todo ello, sistemas caóticos, sistemas que presentan una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales de las que parten (a la *variación* de las condiciones iniciales, diría el profesor Frederic Munné, 1994a; 1995a), en tanto a los procesos no lineales que les son característicos. Debemos matizar por ello la afirmación anterior: *los sistemas muy alejados del equilibrio son sistemas caóticos*.

También hemos de tener presente que sistema puede ser estable en cuanto a algunos de sus elementos e inestable si lo referimos a otros. Estabilidad e inestabilidad pueden coexistir en un sistema, a diferentes niveles. En el ejemplo anterior que hemos puesto podríamos argumentar que, aunque es cierto que el lápiz ya no está en su posición erguida, sigue siendo un lápiz. Es decir, ha permanecido estable en un metanivel. Otro ejemplo que nos puede ilustrar puede ser el análisis de cualquier sistema ecológico. Un ecosistema es metaestable, debido a que pocas perturbaciones son capaces de superar su poder de integración. Ahora bien, ello no debe llevarnos a pensar que dichos sistemas son estructuralmente estables, dado que en ellos existen cambios dramáticos como, por ejemplo, la desaparición de especies.

En segundo lugar, y como ya hemos apuntado mínimamente, en los sistemas en y cerca del equilibrio predominan los procesos lineales, mientras *que en los sistemas alejados del equilibrio predominan los procesos no lineales*.

Dos son los aspectos diferenciales entre ambos tipos de procesos que queremos destacar aquí. De un lado, la proporcionalidad en los cambios en las dinámicas lineales frente a la no proporcionalidad en los cambios de los procesos no lineales. De otro, la bifurcación de las soluciones en las dinámicas no lineales, en especial cuando la tasa de no-linealidad es alta, aspecto éste que queda patente en los estudios de Robert May con la ecuación logística (ver apartado 3.2.3.1.).

Un proceso es lineal si un cambio en cualquier variable inicial produce un cambio en esa misma variable un instante posterior y un cambio n-veces mayor en esa variable inicial produce un cambio n-veces mayor en la misma en el instante posterior (Lorenz, 1993). Linealidad es, por tanto, sinónimo de proporcionalidad. Por el contrario, un proceso no lineal es aquél que no es completamente lineal. Se trata del aspecto de la no linealidad que hemos apuntado al hablar de inestabilidad.

Por ejemplo, para un determinado valor, digamos, 0.1, una función del tipo $f(x)=2x/1.75$ genera un resultado igual a 0.11; para un valor 0.2, un resultado de 0.22;

para un valor de 0.3, 0.34; para 0.4 resulta 0.45; para 0.5 un 0.57; etcétera. Resultados que pueden representarse gráficamente alineándose todos ellos en una línea recta (de ahí el término de lineal). En cambio, una función como la ecuación logística con una alta tasa de no-linealidad como $f(x)=3.99\cdot x\cdot (1-x)$, genera, aplicándola a los mismos valores, los siguientes resultados: 0.35, 0.63, 0.87, 0.95, 0.99, 0.95, 0.87, etcétera. Secuencia que como vemos no mantiene una proporcionalidad como el caso anterior.

Esta no proporcionalidad nos sirve ahora para refrendar, a ejemplo de ilustración operativa, que en un sistema en el que predominen los procesos no lineales, hay puntos de mayor apalancamiento, tal y como se defiende desde la Teoría de Sistemas y también desde la Dinámica de Sistemas. Es decir, puntos en los cuales se producen cambios auténticamente desproporcionados a la acción que se ejerce. En el ejemplo que acabamos de poner de la ecuación logística, un cambio del valor 0.1 a 0.2 provoca un efecto mucho mayor que un cambio del valor 0.4 a 0.5.

El segundo aspecto de la no-linealidad que despierta nuestro interés es la pérdida de la unicidad de las soluciones. En los sistemas regidos por dinámicas no lineales hay más de una solución posible. Las soluciones se bifurcan y el sistema adoptará una de entre las posibles (Wagensberg, 1986). Resulta muy ilustrativo de este aspecto la figura 24 con el abanico completo de valores que puede tomar un sistema caótico. El que las soluciones pierdan la unicidad se hace posible en la medida en que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de un proceso llevan al sistema a estados muy distintos en las condiciones finales. En los procesos lineales esto no ocurre. Las pequeñas diferencias iniciales se siguen manteniendo igual, o al menos, proporcionales, con el paso del tiempo.

En tercer lugar, otra característica diferencial de los sistemas alejados del equilibrio frente a los sistemas en y cerca de equilibrio lo constituye *el papel que el azar toma en sus dinámicas*. Así, en los sistemas en y cerca del equilibrio se caracterizan por dinámicas lineales y ordenadas. El eterno movimiento, siempre igual, de los planetas constituye un ejemplo paradigmático de ello. El azar, no juega ningún papel importante en el estado final del sistema. Se trataría de un "azar benigno" en palabras de Mandelbrot (1996), un azar que se somete a la ley de los grandes números y que queda absorbido. De un azar que se distribuye de manera normal en torno al valor medio, que actúa de punto de equilibrio, configurando con ello una pauta de regularidad final no aleatoria (el clásico ejemplo del lanzamiento de un dado un número elevado de veces es muy ilustrativo en este sentido). Es un azar que puede ser tratado con las técnicas estadísticas al uso (por ejemplo, técnicas de filtrado en el estudio de series temporales).

Sin embargo, en los sistemas alejados del equilibrio las dinámicas son esencialmente no lineales. El clima meteorológico nos sirve de ejemplo. El azar, aquí, sí juega un papel importante. El azar decide. La mínima fluctuación, antes irrelevante, decide ahora el futuro del sistema. El pequeño empujón que no desestabilizaba al péndulo del reloj de pared, ahora es capaz de tumbar un lápiz. El azar deja de ser benigno para convertirse en un "azar salvaje" (Mandelbrot, 1996). Aquí, las fluctuaciones no se neutralizan, apareciendo, de manera ocasional, enormes desviaciones, o muchas desviaciones pequeñas pero todas en igual dirección. El azar salvaje de Mandelbrot es el azar de la vida, la repetición de pautas (largos años de sequía continuada) y la aparición repentina y brusca de grandes cambios (llegada de un año extremadamente lluvioso). Es el azar recogido por nuestra tradición cristiana ('siete años de vacas gordas seguidos de siete años de vacas flacas') y, también, en parte, el azar reflejado en el 'sino' de nuestra tradición árabe ('estaba de pasar' o 'las desgracias vienen en tandas de a tres'). Estas dos tendencias en el azar, de un lado la continuidad, del otro la persistencia, denominadas por Mandelbrot (1977) efecto Noé y efecto José respectivamente en honor de los narradores bíblicos que relataban historias de continuidad, el primero de ellos, o de cambio, el segundo, son fáciles de encontrar en la naturaleza. Por ejemplo, en el estudio de las crecidas del Nilo, en la turbulencia de fluidos o en diversos ruidos muy conocidos por las personas dedicadas a la electrónica, como el denominado ruido 1/f.

En definitiva, el azar salvaje es un azar que parece estar cambiando continuamente de carácter, y por ello, requerirá del uso de otro tipo de técnicas para su estudio diferentes a las utilizadas en el estudio del azar benigno (por ejemplo, el empleo de mapas de retardo para buscar los posibles atractores subyacentes).

Finalmente, y en cuarto lugar, los sistemas alejados del equilibrio difieren de los sistemas en y cerca del equilibrio por una cierta indeterminación de sus dinámicas. En efecto, todo lo anterior nos conduce a dos concepciones acerca del futuro de un sistema. En el primer caso, el futuro está ya dado gracias al determinismo y la predecibilidad de la dinámica: el 26 de octubre del 2028, a las siete y media de la tarde hora española, el asteroide 1997 XF.11 pasará a unos 48.300 kilómetros de altura sobre la Tierra. En el segundo caso, el futuro será uno de los posibles: el mismo 26 de octubre del 2028 no podremos saber, a fecha de hoy, que tiempo hará, y ningún especialista meteorólogo de prestigio se atreverá a dar un pronóstico. Y ello incluso aunque el futuro también esté perfectamente determinado.

En los sistemas muy alejados del equilibrio, caóticos, la dinámica es determinista e indeterminista al mismo tiempo. Se trata de una nueva paradoja. En efecto, es determinista por cuanto la dinámica obedece a unas reglas muy concretas. Y, sin embargo, la mínima, milésima, millonésima variación de las condiciones iniciales hace que la dinámica pueda pasar por estados muy diferentes. Si nos resulta del todo imposible conocer la posición exacta del sistema, la dinámica se nos aparece como indeterminista. Determinismo e indeterminismo, se nos pueden presentar entonces como una construcción humana. El determinismo como '*una abstracción y una simplificación (por lo demás muy humana) que practicamos para hacer inteligible la complejidad cotidiana y actuar con ella*' (Margalef, 1986, pág. 83). Y el indeterminismo como '*la propia desesperación que nos embarga cuando entender o explicar la complicación requiere una información a la que no accedemos*' (ob. cit.).

Por este motivo, bien podemos decir que frente al futuro cierto, ya dado, que siguen los sistemas en y cerca del equilibrio, en los sistemas alejados del equilibrio el futuro es abierto. El futuro se convierte en una construcción de los pasos por los que previamente haya pasado la dinámica del sistema. Se entiende por todo ello el prestigio de disciplinas como la Astrología y el descrédito, en cuanto a predicciones se refiere, de las personas dedicadas a la Meteorología.

Determinismo frente a construcción del futuro. De otra manera, y recogiendo palabras del teórico de sistemas Ervin Laszlo (1988): "*los sistemas dinámicos* -en concreto se está refiriendo a lo que denomina sistemas de tercer estado, claramente asimilables a los sistemas alejados del equilibrio de Prigogine- *no están sometidos a una determinación rigurosa. No tienen trayectorias singulares, sino haces de trayectorias*" (pág. 19). Se abren mapas de posibilidades sobre la dinámica del sistema. Es la creatividad del caos, fruto de la no-linealidad inherente.

Por otra parte, y para finalizar, bien podemos considerar que los sistemas alejados del equilibrio nos están ofreciendo un tercer tipo de posibilidad evolutiva en la dinámica de un sistema (Prigogine, 1997). En efecto, frente al futuro ya escrito en las dinámicas deterministas en la que no es posible la aparición de novedad alguna, y también frente al desarrollo azaroso de una dinámica totalmente aleatoria, absurda, en la que cualquier suceso posible puede ser el siguiente, el desarrollo de los sistemas alejados del equilibrio nos invita a pensar en una evolución inestable y a la vez ordenada, incierta y autoorganizada.

En la tabla 5 presentamos, a modo de resumen, las características diferenciales más relevantes entre los sistemas en y cerca del equilibrio, frente a los sistemas alejados del equilibrio, que hemos ido detallando a lo largo de este apartado. En dicha tabla podrá observarse una última fila referida al modelo de ciencia subyacente en ambas concepciones a la que no hemos hecho referencia explícita aquí por considerarla obvia. La Mecánica Clásica ha tratado con sistemas en equilibrio o cercanos a él, desechando el estudio de sistemas que se alejaran de estas condiciones, como por ejemplo los fluidos. Su objeto de estudio paradigmático ha sido la dinámica planetaria, con una descripción de la misma que aún hoy nos sigue maravillando y, con unos éxitos que han ido mucho más allá del terreno puramente científico para entrar en fenómenos de interés a escala de la totalidad de la humanidad (por ejemplo, la llegada del hombre a la Luna en julio de 1969 retransmitida en directo por televisión a millones de personas). Por el contrario, las Teorías de la Complejidad se han interesado por los sistemas alejados del equilibrio, por el estudio de la turbulencia, de las fluctuaciones, del ruido, etcétera. Desde un punto de vista predictivo, los éxitos de esta ciencia han sido menos sorprendentes que los conseguidos por la mecánica celeste. Pero es esta ciencia la que se acerca a *la necesidad de entender cómo aparece lo cualitativamente nuevo*. Recogiendo inquietudes de Tomás Ibañez (1982) diríamos que la Mecánica Clásica ha sabido describir el orden constituido, pero no la constitución de ese orden. Son teorías como la de los sistemas alejados del equilibrio, teorías del caos, teoría de la vida en el borde del caos, teoría de la criticalidad autoorganizada, etcétera, las *ciencias de la complejidad* en definitiva (Laszlo, 1988), las que nos comienzan a dar cuenta de procesos de emergencia, de creación, de génesis.

Tabla 5: Dos marcos de referencia para el estudio de los sistemas.

Tipo de Sistemas	Sistemas ... en Equilibrio y cerca del Equilibrio Sistemas Estables	Sistemas ... alejados del Equilibrio Sistemas Inestables
Procesos característicos	Procesos Lineales	Procesos No-Lineales
Papel del azar	Azar benigno (Mandelbrot)	Azar salvaje (Mandelbrot)
Evolución del Sistema	Futuro dado: Determinismo	Un futuro de entre los posibles: Construcción
Modelo de Ciencia subyacente	Laplace, Newton **Mecánica Clásica**	Maxwell, Poincaré **Teorías de la Complejidad**

3.4.3.- Caracterización de la Complejidad.

Complejidad es una palabra común en la ciencia en general. La fusión de un átomo de uranio ocurre tras una serie de reacciones complejas, las reacciones entre neuronas acontecen con el intercambio complejo de determinadas sustancias químicas, el funcionamiento biológico de una célula procariota puede caracterizarse como complejo, una colonia de hormigas muestra toda una serie de comportamientos complejos, las organizaciones humanas son habitualmente calificadas como complejas, etcétera.

No obstante, a la hora de caracterizar a la propia complejidad en la ciencia en general ésta suele quedar bastante desvirtuada reduciéndola a un sencillo matiz de número. Lo complejo se nos presenta entonces como aquello para cuya explicación necesitamos recurrir a muchos elementos. Lo complejo se confunde con lo complicado (Munné, 1994a). Por ejemplo, en el Diccionario de Uso del Español, María Moliner recoge las siguientes acepciones principales de *complejo*:

1. *Compuesto*: Formado por partes o por la reunión de varias cosas.
2. *Complicado*: Se aplica a un asunto en que hay que considerar muchos aspectos, por lo que no es fácil de comprender o resolver.

Y para el término *complicado* también en su sentido principal:

1. Se aplica a las cosas cuya estructura no se ve o no se comprende fácilmente, por constar de muchas partes, episodios, etc. mezclados y sin orden aparente.

También un diccionario técnico autorizado define lo complejo en su significación principal como algo “que comprende muchos elementos y en general un gran número de elementos” (Lalande, 1962; recogido por Munné, 1994a, pág. 11). Es por ello que desde la ciencia más tradicional se ha pensado que los sistemas complejos necesitarán de descripciones complejas, accesibles éstas con el uso de herramientas analíticas sofisticadas (Lewin, 1992) o bien con la hábil combinación de las leyes de lo simple (Wagensberg, 1985).

Si algo nos ha debido quedar claro de la exposición de las diferentes teorías vistas a lo largo de este capítulo es que la complejidad tiene poco que ver con el número y sí mucho con la relación (Munné, 1994a). De hecho un parte importante de los sistemas considerados hasta aquí son relativamente simples en cuanto al número de variables que conforman (por ejemplo, el sistema de ecuaciones de Lorenz, la ecuación logística, etcétera) pero presentan una extrema complejidad en sus comportamientos (Lewin, 1992). Detengámonos con más detalle en esta concepción de corte más cualitativo sobre la complejidad.

Aunque aún no se disponga de una definición de complejidad que posea generalidad suficiente y una amplia aceptación (Kauffman, 1992), sí están quedando claras algunas de sus propiedades. Está siendo por ello más útil el abordaje de la complejidad desde sus propiedades básicas que pretender dar una definición formal de la misma. En este sentido, el propio Kauffman (ob. cit.), por ejemplo, propone las siguientes:

- la existencia del efecto mariposa, de caoticidad
- la cristalización del orden en sistemas muy desordenados, la propiedad de autoorganización, y
- la existencia de atractores extraños, indicadores de un orden complejo.

Como puede verse en la caracterización de Kauffman la complejidad ronda muy pareja al caos. Dos de las propiedades fundamentales que menciona son sendas facetas del caos: la existencia del efecto mariposa (o sensibilidad a las condiciones iniciales que apuntamos al caracterizar al caos en el capítulo anterior) y la existencia de atractores extraños (o la mezcla de orden y desorden que también habíamos mencionado). Lo nuevo radicaría ahora en el énfasis puesto en la autoorganización como la cristalización de un orden complejo y emergente.

Otro autor que se ha acercado al abordaje de qué es la complejidad ha sido Frederic Munné (1993, 1994a, 1994b, 1995a), psicólogo social de la Universitat de

Barcelona y especialista en epistemología. Munné considera que la complejidad puede describirse al menos por cuatro notas:

- borrosidad
- catastrofismo
- fractalidad, y
- caoticidad.

Para Munné este grupo de propiedades, de teorías ya que están claramente formalizadas, conforman una visión con un marcado carácter cualitativo de la complejidad. Y declara que "*afirmar que la realidad es compleja, significa al menos cuatro cosas: 1) Que la realidad es borrosa. 2) Que la realidad es catastrófica. 3) Que la realidad es fractal. Y 4) que la realidad es caótica*" (1995a, pág. 9, la cursiva es nuestra). De estas cuatro teorías, aquí nos hemos centrado en la última, aunque hemos visto las relaciones que el caos mantiene con la fractalidad, e incluso nos hemos aproximado a la propia teoría fractal (ver Cuadro 3).

De otra parte, para Munné (1995a) este conjunto de teorías tienen un elevado valor epistemológico por cuanto afrontan la realidad sin prescindir de su complejidad. Además, a la luz de estas teorías la realidad se nos presenta como una realidad paradójica: una realidad que no es nítida ni tampoco dual (aportación de la teoría de los conjuntos borrosos), una realidad que no es continua (catástrofes) ni discontinua (borrosidad), ni estable ni inestable (teorías del caos), ni reiterativa ni innovadora (caos y fractales), ni ordenada ni desordenada (caos y fractales). De una realidad que no es ni lo uno ni lo otro. O dicho de otra forma, de una realidad que no es lo uno sin lo otro.

Bajo este prisma, "el caos es uno de los ingredientes constitutivos de la complejidad" (Munné, 1993, pág. 46). Y la aportación más fructífera al tema de la complejidad según el propio Munné (1995a). Ahora bien, también es preciso tener claro que con la visión que aquí estamos desarrollando, referente al caos, no se da cuenta de toda la complejidad. Es obvio. Por decirlo de alguna forma, lo que hacemos es analizar uno de sus aspectos relevantes. Uno de los aspectos en los que la complejidad se manifiesta. Como gusta decir a Munné referentes a otros ámbitos de corte psicosocial, como por ejemplo el self (1989, 1997b; véase también Codina, 2000), la complejidad también es un objeto inabarcable no reducible a ninguno de los aspectos en los que se manifiesta, matizando además que la inabarcabilidad no significa que no podamos conocerlo todo sino más bien que no podemos conocerlo todo a la vez. Se hace preciso cambiar de aspecto a considerar.

Esta inabarcabilidad del objeto 'complejidad' contrasta con el claro interés holístico y no reductible de las diferentes teorías que hemos ido exponiendo, desde la teoría general de sistemas hasta la teoría de la vida en el borde del caos o la teoría de los sistemas alejados del equilibrio, por ejemplo. Es por ello que otro autor como el sociólogo francés Edgar Morin (1990) afirme que el pensamiento complejo se mueve en la tensión permanente de aspirar a un saber no parcelado, no reduccionista, o al menos no tan reduccionista diríamos nosotros, y a la vez reconocer lo incompleto de todo conocimiento. Merece que nos adentremos un poco más en la aportación de Morin a la complejidad, una aproximación también realizada desde la epistemología.

Para Morin es complejo aquello que no puede resumirse en una palabra maestra, aquello que no puede retrotraerse a una ley, que no puede reducirse a una ley. Y afirma: "la complejidad no puede más que expresar nuestra turbación, nuestra confusión, nuestra incapacidad para definir de manera simple, para nombrar de manera clara, para poner en orden nuestras ideas" (1990, pág. 21). De esta forma, Morin ve una clara relación entre complejidad y azar: "en un sentido, la complejidad *siempre está relacionada con el azar*" a la vez que este azar se da "*en el seno de los sistemas ricamente organizados*" (pág. 60). La complejidad se halla ligada por tanto a una cierta mezcla de orden y desorden según Morin, planteamiento que se acerca a la concepción de complejidad como *en el borde del caos*, acepción que es la más común en los estudios sobre complejidad (Horgan, 1995).

Pero este no es el único tipo de complejidad según Morin. Junto a esta complejidad ligada con el desorden, con el azar, también nos presenta una complejidad relacionada con las *contradicciones lógicas*. De este modo para Morin la complejidad se asoma allí donde no podemos remontar una contradicción y debemos aceptarla. Quizá la más clásica de todas ellas en el pensamiento científico occidental haya sido la oposición entre orden y desorden. Y más aún en nuestros días cuando se constata empíricamente que cierto desorden se hace necesario para la aparición de estructuras y de organización biológica, para la aparición del orden. Este tipo de complejidad es una heredera del pensamiento clásico manifestado por Heráclito en su lucha de opuestos y expresada en afirmaciones como "lo único que permanece es el cambio" o su célebre "vivir de muerte, morir de vida".

A modo de síntesis, Morin describe la complejidad como conformada por tres principios:

- el *principio dialógico* que nos permite mantener la dualidad en el seno de la unidad al asociar dos términos complementarios a la vez que antagonistas,

- el *principio de recursividad organizacional* según el cual los productos y efectos son a la vez causas y productores de aquello que los produce, y

- el *principio hologramático* que asocia el todo y la parte: no solamente la parte está en el todo, sino que el todo también está en la parte.

Fijémonos en que el principio dialógico expondría la relación orden-desorden recogida en el caos, el principio de recursividad organizacional puede asimilarse a los procesos de retroalimentación incluidos mediante la iteración en las dinámicas caóticas, y el principio hologramático es similar a la propiedad fractal de relacionar el todo con sus partes a escalas muy diferentes.

Ahora bien, en la relación que Morin establece entre complejidad y azar, en el primer tipo de complejidad del que nos habla, hay una interpretación posible que se aleja claramente de la filosofía básica subyacente a las teorías del caos y, por extensión, a las teorías de la complejidad. En efecto, es clásico concebir el azar, desde la teoría de la probabilidad por ejemplo o desde el marco más genérico de la mecánica estadística, como falta de información (e. g. Hacking, 1990; Ruelle, 1991). Y claro, la falta de información es por parte del sujeto. Es decir, con esta visión del azar, y de la complejidad como fenómeno que lo contiene, estamos tomando partido por una interpretación con un cierto poso de fatalidad por cuanto se transmite que el ser humano se muestra incapaz de hallar la certeza. Lo cual puede ser o no cierto pero en ningún caso se trata de la noción de azar, la noción de incertidumbre, transmitida por el caos. Un autor que ha sabido abordar este tema ha sido Jorge Wagensberg, físico de la Universitat de Barcelona.

Wagensberg recoge la problemática en una sugerente e incitante pregunta: *¿es el azar un producto de la ignorancia o un derecho intrínseco de la naturaleza?* (Wagensberg, 1981, 1985, 1986).

En su sentido original el azar se halla relacionado con el de falta de información (ver por ejemplo Landsberg, 1986 o Thom, 1986). Así podríamos definir un fenómeno aleatorio como “aquél que no admite ser descrito por un formalismo, que se resiste a ser reducido a un proceso algorítmico conocido” (Wagensberg, 1981, pág. 32). Y define formalmente el azar como:

> “Una serie de dígitos es aleatoria si el menor algoritmo capaz de generarla contiene aproximadamente los mismos bits de información que la propia serie” (1985, pág. 58).

Esta definición de azar es claramente asimilable a la definición de complejidad dada por Morin (de su primer tipo de complejidad; ver más arriba). Y también es similar a definiciones clásicas de desorden, por ejemplo: ‘el orden implica la posibilidad de reducir una multitud ilimitada a una unidad o, al menos, a una multitud limitada, o bien, la posibilidad de reducir lo indeterminado a lo determinado. El “desorden”, en consecuencia, no sería más que la ausencia de orden, es decir, de criterio, de determinación’ (Berti, 1996). Wagensberg afirma que por el momento “no hay razonamiento intelectual ni circunstancia experimental que (..) nos indique si el azar corresponde a un desconocimiento del observador o de la propia naturaleza” (1981, pág. 42), aunque en su análisis se decante partidario de la existencia de un azar al que califica de ontológico.

En efecto, desde otro nivel de análisis, dicho autor diferencia entre lo que llama un *azar epistemológico* que es un azar corrosivo y deshacedor que sigue a rajatabla el segundo principio de la termodinámica, un camino contra el que luchan las formas vivas, y un *azar ontológico*, un azar que representa la contingencia pura que interviene ciegamente en el universo, un azar creador y hacedor con el que especulan las organizaciones espontáneas lejos del equilibrio, un azar que se hace necesario para la producción continua de nuevas estructuras y estructuraciones (Wagensberg, 1982, 1985). Un azar al que se refería Poincaré cuando al hablar sobre el desconocimiento exacto de las condiciones iniciales afirmaba "la predicción se hace imposible y aparece el fenómeno fortuito" (ver Cuadro 2).

Un dato más a favor de la posición de Wagensberg nos la proporciona la teoría algorítmica de la información en la que se ha demostrado que tanto la incompletitud como la aleatoriedad son naturales en la aritmética (Chaitin, 1988) no pudiendo eliminarse la incertidumbre en el mundo de las matemáticas. Dato que es acorde con la proposición principal del teorema de Gödel según el cuál existen proposiciones matemáticas formuladas de forma precisa para las que no puede demostrarse con exactitud que sean verdaderas o falsas (Ruelle, 1991). No estamos, por tanto, ante un problema de falta de información.

Otro aspecto a considerar de la complejidad es su relación con el concepto de *totalidad*. A menudo, la complejidad suele ser confundida con el término de totalidad o completud. Y es que el conocimiento complejo tiene la pretensión de acercarse a un conocimiento total. En el Instituto de Santa Fe se considera que las nuevas ciencias de la complejidad pueden entenderse como un tipo de gran holismo unificado con la pretensión de abarcar e integrar campos científicos desde la biología evolutiva hasta la economía, la política o la historia (Waldrop, 1992).

También Morin, por ejemplo, afirma que "la aspiración de la complejidad lleva en sí misma la aspiración a la completud" (1990, pág. 100-101), y continúa "pero, en otro sentido, la conciencia de la complejidad nos hace comprender que no podremos escapar jamás a la incertidumbre y que jamás podremos tener un saber total" (pág. 101).

Igualmente Munné (1994b) se ha acercado a esta relación proponiendo que, de un lado, se precisa conocer la realidad como fenómeno total, pero de otro, siempre nos encontramos con el carácter inabarcable de la realidad. La cuestión fundamental para Munné de esta relación es de sí la complejidad reclama o no la totalidad. Y es una forma de abordaje de sumo interés por cuanto la complejidad entendida como un tipo de relación entre los elementos de un sistema (relación caracterizada por su caoticidad, catastrofismo, no-linealidad, etcétera) o como definición de elementos sobre la base de su posibilidad (borrosidad) no precisa de la totalidad, entendida como el tratamiento o estudio de todas las partes del sistema. La complejidad ya puede encontrarse en cada una de las partes y no se hace necesario recurrir a todo el sistema para atisbarla. Un ejemplo claro nos lo ofrecen los fractales: basta mirar cualquier parte de un fractal para captar su complejidad sin necesidad de recurrir a un conocimiento de todo el fractal. Es más, esto último puede resultar del todo imposible, por ejemplo, en el caso del conjunto de Mandelbrot en el que podemos ampliar una y otra vez *ad infinitum* cualquier zona seleccionada y nos continuarán apareciendo nuevos detalles de su complejidad.

Además, la no necesidad de la totalidad para afrontar el estudio de la complejidad se nos pone de relieve en otro hecho. Cuando queremos realizar una descripción de un sistema complejo, caótico, no necesitamos del estudio de todas las variables que lo componen. Aquí radica precisamente la justificación del uso de una herramienta como los mapas de retardo (ver apartado 3.2.2.1) para caracterizar la dinámica que ha dado lugar a una evolución temporal de una sola variable perteneciente al sistema estudiado. Basta con conocer el esqueleto básico de las interacciones más relevantes en el sistema para que un modelo simple represente y recoja bien la complejidad de la dinámica (Solé, 1994).

3.4.4.- Teoría de los Sistemas Autopoiéticos.

Como última teoría de este capítulo, vamos a exponer la teoría de los sistemas autopoiéticos de los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela. Aunque es una teoría que, en cierta medida, se desmarca de todo lo desarrollado hasta aquí, nos aporta una visión para entender aún más el fenómeno auto-organizativo. De ahí que esté justificado su incorporación dentro de este capítulo en el que nuestra ruta de exploración nos ha llevado a estudiar la autoorganización como fenómeno definitorio de los sistemas caóticos y complejos.

3.4.4.1.- Autopoiesis: la organización de los sistemas vivos.

Desde sus inicios, Maturana y Varela han estado interesados en caracterizar la vida, los seres vivos, en sus rasgos esenciales. Su teoría es una teoría centrada en la organización de lo vivo; la pregunta a la que pretenden responder sería la siguiente: ¿qué clase de sistema es un ser vivo?, dicho de otra forma, ¿qué tienen en común todos los sistemas vivos que nos permiten calificarlos de tales? Y para responder a esta pregunta, Maturana y Varela se apartan de la concepción de estos sistemas como totalidades sistémicas caracterizadas por su apertura hacia el entorno y el procesamiento de energía (visión propia de la teoría general de sistemas como hemos visto) para afrontar su estudio en "su condición de entes discretos, autónomos, que existen en su vivir como unidades independientes" (Maturana, 1994, pág. 11).

En efecto, en su trabajo fundacional "De máquinas y seres vivos" (Maturana y Varela, 1973; posteriormente traducido al inglés, junto a otro texto del propio Maturana sobre biología de la cognición, bajo el título de "Autopoiesis and cognition: the realization of living, 1980) estos autores consideran que la *autonomía*, con respecto al medio se sobreentiende, es un rasgo tan obvio en los sistemas vivos que siempre que observamos un sistema que parece autónomo de su medio tendemos a considerar que es un sistema vivo. Un ejemplo nos ilustrará esta idea. Una roca sufre los avatares de su medio, calentándose cuando sube la temperatura y enfriándose cuando esta desciende. Por el contrario, un ser vivo es capaz de mostrar cierta independencia de este medio, manteniendo una temperatura interna independiente de la temperatura exterior.

Los seres vivos tienen una extrema habilidad para conservarse a sí mismos, para conservar su identidad, a pesar de los cambios continuos en sus entornos, demostrando con ello una alta y continuada capacidad homeostática, una ultraestabilidad que diría Ashby (1960). Por esto, Maturana y Varela considerarán dos las características esenciales de todo sistema vivo:

1) la conservación de su identidad, y
2) el mantenimiento o la invarianza de las relaciones internas al sistema vivo y que son definitorias del mismo; es decir, el mantenimiento de su organización.

Obviamente, la primera es consecuencia de la segunda. El mantenimiento del patrón de relaciones, de la organización del sistema le conduce a la conservación de su identidad como autonomía con respecto al medio.

A partir de aquí, aprehender qué es un sistema vivo se torna en una tarea de comprensión de su organización. Y para caracterizar la organización de los sistemas vivos introducen el término *autopoiesis* derivado del griego y cuya significación más inmediata sería la de autorreproducción. Con la noción de autopoiesis, Maturana y Varela pretenden recoger en una sola característica lo esencial de la organización de los sistemas vivos.

Autopoiesis es un término resbaladizo en cuanto a su definición, sobre todo cuando es empleado por sus autores originales. De hecho, las definiciones dadas por Maturana y Varela han sido atacadas de circulares y tautológicas (Scheper y Scheper, 1996). En "De máquinas y seres vivos", Maturana y Varela no definen qué es la autopoiesis de manera explícita, en cambio sí definen qué es una máquina autopoiética. Antes de continuar, aclarar que utilizan el término máquina a fin de remarcar el dinamismo de los sistemas a los que se van a referir. Una máquina autopoiética, dirán Maturana y Varela (1973, pág. 69), es:

> "*una máquina organizada como un sistema de procesos de producción de componentes concatenados de tal manera que: i) generan los procesos (relaciones) de producción que los producen a través de sus continuas interacciones y transformaciones, y ii) constituyen a la máquina como una unidad en el espacio físico*" (la cursiva es original de los autores).

Una máquina autopoiética sería "un sistema homeostático que tiene a *su propia organización* como la variable que mantiene constante" (ob. cit., pág. 69, la cursiva es original de los autores). Como consecuencia de esta definición, las máquinas autopoiéticas, y siempre según los autores:

1) son autónomas, en tanto que subordinan todos sus procesos al mantenimiento de su organización;

2) poseen individualidad al conservar activamente su identidad independientemente de sus interacciones con el entorno (incluidas sus interacciones con un observador);

3) son definidas como unidades por, y sólo por, su organización autopoiética, es decir, sus operaciones establecen sus propios límites en el proceso de autopoiesis;

4) no tienen ni entradas ni salidas, aunque puedan ser perturbadas por acontecimientos externos y experimentar en consecuencia cambios internos para compensar esas perturbaciones (luego volveremos sobre esta flagrante contradicción).

Una vez caracterizadas las máquinas autopoiéticas, Maturana y Varela entran a considerar que si los sistemas vivos son máquinas (repetimos, máquinas en el sentido de dinamismo, de movimiento) parece bastante claro que son máquinas autopoiéticas, pudiendo afirmarse también lo inverso: toda máquina autopoiética es un sistema vivo. Con todo lo cual, "*la noción de autopoiesis es necesaria y suficiente para caracterizar la organización de los sistemas vivos*" (1973, pág. 73) y, a partir de aquí, las nociones de teología y teleonomía se muestran prescindibles en la comprensión de la organización de lo vivo, teniendo éstas sólo sentido en el contexto de la observación del sistema, pero nunca en el dominio de la organización autopoiética. Como ejemplo paradigmático de sistema autopoiético Maturana y Varela proponen a la célula.

En un trabajo posterior Maturana también nos ofrece la definición de autopoiesis como "la red de producciones de componentes, que resulta cerrada sobre sí misma porque los componentes que produce la constituyen al generar las mismas dinámicas de producciones que los produjo, y al determinar su extensión como un ente circunscrito a través del cual hay un continuo flujo de elementos que se hacen y dejan de ser componentes según participan o dejan de participar en esa red" (Maturana, 1994, pág. 159).

Otras definiciones del término más claras las encontramos en otros autores que también han tratado sobre la autopoiesis. Por ejemplo, Zeleny (1981) considera que la autopoiesis hace referencia a "una unidad realizada a través de una organización de producción de procesos cerrada tal que a) la misma organización de procesos es generada mediante la interacción entre sus componentes, y b) como resultado de estos procesos emergen unas fronteras en el sistema" (pág. 6).

Y más clara aún es la definición dada por Torres Nafarrete en la introducción al texto de Maturana "La realidad: ¿objetiva o construida? I. Fundamentos biológicos de la realidad" de 1995. La autopoiesis, nos dice Torres Nafarrete, hace referencia a un fenómeno de radical circularidad: "las moléculas orgánicas forman redes de reacciones que producen a las mismas moléculas de las que están integradas" (1995, pág. xiii).

El propio Torres Nafarrete nos ofrece una caracterización de las propiedades del fenómeno autopoiético desarrollado en cinco propiedades básicas:

1) Autonomía: "(..) la célula requiere de la creación de distancia con respecto al medio circundante. La autonomía de lo orgánico, en último término, sig-

nifica que sólo desde la perspectiva de la célula se puede determinar lo que es relevante y, sobre todo, lo que es indiferente" (pág. xiii-xiv).

2) Emergencia: "(..) el surgimiento del orden cualitativo de la célula (...) no puede deducirse a partir de las características materiales o energéticas que, a su vez, componen la célula. La emergencia señala precisamente la irrupción de un nuevo orden, cuyas características sólo pueden ser inducidas una vez que elnuevo orden ya está constituido" (pág. xiv).

3) Clausura de operación: "(..) los sistemas autopoiéticos son sistemas cuya operación es cerrada y cuyos componentes son producidos al interior de un proceso recursivo que se lleva a cabo dentro de una retícula clausurada. (..) Lo que está clausurado en la autopoiesis es el control mismo mediante el cual los elementos se organizan de manera emergente (..); (..) el sistema sólo puede disponer de sus propias operaciones (..), dentro del sistema no existe otra cosa que su propia operación" (pág. xv).

4) Auto construcción de estructuras: "(..) dado que la operación de la célula está clausurada, no puede importar estructuras: ella misma debe construirla (..). Los sistemas clausurados en su operación producen sus propios elementos y, por consiguiente, sus propios cambios estructurales. No existe una intervención causal del entorno en el sistema sin que el mismo sistema lo provoque: todo cambio de estructuras trátese de procesos de adaptación o de rechazo es, en última instancia, autoinducido" (pág. xv).

5) Autopoiesis: "(..) determinación del estado siguiente del sistema a partir de la estructuración anterior a la que llegó la operación" (pág. xv).

En resumen, un sistema autopoiético es un sistema cuya característica fundamental y definitoria es que se produce continuamente a sí mismo, constituyéndose por esto la teoría de los sistemas autopoiéticos como una teoría de la organización de lo vivo por cuanto la organización de un sistema vivo es lo que le permite esta peculiaridad que constituye la capacidad de autorreproducción. Y con ello se forman diferentes a su medio circundante, preservando su autonomía. Maturana y Varela lo expresan muy bien: "la característica más peculiar de un sistema autopoiético es que se levanta por sus propio límites, constituyéndose como distinto del medio circundante por medio de su propia dinámica, de tal manera que ambas cosas son inseparables" (1990, págs. 38-40).

3.4.4.2.- Aportaciones principales de la Teoría de los Sistema Autopoiéticos.

Como teoría biológica, la de los sistemas autopoiéticos ha tenido evidentes implicaciones en esa disciplina que han llevado, por ejemplo, a una autora especialista en el origen de la vida como Lynn Margulis a adoptar la autopoiesis como el criterio para determinar y poner fecha al origen de los seres vivos. Igualmente, desde un punto de vista epistemológico la teoría de los sistemas autopoiéticos ha tenido claras aportaciones por cuanto propone toda una biología del conocimiento (Maturana y Varela, 1973, 1980, 1990; Maturana, 1995, 1996) en la que se apunta la importancia de la autorreflexividad del conocimiento, aportación que claramente se podría conectar con las contribuciones de la Gestalt a la comprensión de los procesos de percepción. Y aportación también que ha sido muy tenida en cuenta por la psicología social crítica ya que está en el fundamento de la concepción constructivista de la realidad. Pero aquí nos interesan sobremanera otras aportaciones más relacionadas con el hilo argumental sistémico que venimos desarrollando a lo largo de todo este trabajo.

De acuerdo con Kickert (1993) son dos las ideas básicas aportadas por la teoría de los sistemas autopoiéticos: una, ofrecer una nueva perspectiva sobre el auto-gobierno de los sistemas autopoiéticos y, dos, ofrecer una perspectiva diferente acerca de cómo entender las relaciones sistema-entorno. Comencemos, por su interés, por desarrollar esta segunda.

Indudablemente, cuando Maturana y Varela (1973, pág. 71) caracterizan a las máquinas autopoiéticas como que "no tienen ni entradas ni salidas" y que cualquier cambio interno surgido para compensar posibles perturbaciones exteriores "está siempre subordinado a la conservación de la organización de la máquina", característica que será definida como clausura operacional, se está entrando en un conflicto con la idea de los sistemas vivos como sistemas abiertos.

Posteriormente, Maturana (1981, pág. 22) salvará este problema al plantear que si bien "los sistemas autopoiéticos pueden satisfacer las imposiciones de la termodinámica en el espacio físico e intercambiar materia y energía, son necesariamente cerrados en las dinámicas de sus estados". La aparente contradicción será recogida desde entonces en una frase muy repetida: los sistemas vivos son organizacionalmente cerrados e informacionalmente abiertos. Aunque claro está, la teoría de los sistemas autopoiéticos pone el énfasis en que lo verdaderamente esencial de lo vivo es lo primero, su carácter cerrado en tanto a la organización de sus procesos, obviando la apertura hacia el exterior como rasgo definitorio de dichos sistemas.

Lo que parece olvidar los autores de la teoría de los sistemas autopoiéticos es que esta clausura operacional sólo se hace posible precisamente por ser abiertos al entorno. En efecto, si entendemos por autopoiesis una tendencia a mantenerse igual a sí mismo, entonces un sistema autopoiético, un sistema vivo debe mantener una tensión crítica con el entorno escapando a sus caprichos y diferenciándose de él (Wagensberg, 1998), es decir, necesariamente lo ha de tener en cuenta. Y para ello ha de mantener unas ligaduras necesarias para el intercambio de energía, materia e información. En palabras de Wagensberg: "la independencia no equivale a aislamiento, sino que es una independencia activa, para cuyo mantenimiento se requiere una gran sensibilidad al entorno y una gran capacidad de modificarlo' (ob. cit., pág. 57). Edgar Morin lo ha sabido expresar de manera atinada: "es su apertura lo que permite su clausura" (1990, pág. 44).

Por ello, la inteligibilidad del sistema debe tener en cuenta al sistema y la relación que mantiene con el ambiente, relación que, en esto si estarían de acuerdo

Maturana y Varela, no es de simple dependencia sino que es constitutiva del propio sistema.

En fin, hemos de entender que la teoría de los sistemas autopoiéticos no contradice la idea que los sistemas abiertos mantienen intercambios con su entorno, sino que entiende esta apertura desde otra perspectiva (Luhmann. 1995). Como argumenta Varela recientemente (1994) el principio de clausura operacional ha de ser entendido como una operación hacia el interior y no como sinónimo de cerrazón o ausencia de interacción, lo cual sería absurdo para el propio Varela.

Y ¿cómo entiende esta apertura hacia el entorno la teoría de los sistemas autopoiéticos? Pues la apertura es entendida como autorreferencia. De otro modo, un sistema autopoiético mantiene una relación con su entorno acorde con su organización interna dado que no puede ser de otra manera ya que el sistema autopoiético no puede entrar en interacciones que no estén ya especificadas en su organización. El entorno es percibido como una proyección de la propia identidad organizativa. Luego las transacciones con el ambiente no son más que autorreferencias (Morgan, 1986; Kickert, 1993; Luhmann, 1995). El interactuar con el entorno como si éste fuera un espejo al que el sistema autopoiético se asoma y sólo se ve a sí mismo sería una buena ilustración gráfica de esta idea de autorreferencia.

La segunda aportación apuntada por Kickert (1993) hacia referencia al apuntar una nueva forma de entender el auto-gobierno de los sistemas autopoiéticos. Kickert está aludiendo en concreto a los sistemas sociales, asumiendo que dichos sistemas son sistemas autopoiéticos, y que los sistemas sociales no necesitan de ningún control externo para su funcionamiento, aspecto que es recogido en la característica de autonomía de todo sistema autopoiético. Antes de abordar esta idea del auto-gobierno conviene que nos detengamos en la extensión de la idea de autopoiesis más allá del contexto biológico del que nace.

En 1973, Maturana y Varela ya hablaban de lo que llamaron sistemas autopoiéticos de mayor orden, como fruto de la interacción y acoplamiento estructural de sistemas autopoiéticos de primer orden. Un ejemplo de estos sistemas de segundo orden lo tendríamos en un organismo, por ejemplo, un ser humano.

Inicialmente, Maturana y Varela no pensaron en la idea de que los sistemas sociales pudiesen ser considerados como sistemas autopoiéticos. De ahí la sorpresa expresada por Varela (1994) al referirse al cómo y por qué una teoría nacida en el ámbito de la organización celular traspasa este campo para adquirir prominencia en terrenos propios de las ciencias sociales. Varela considera que ello es debido en gran medida a que la noción de autopoiesis participa del giro ontológico de la modernidad según el cual el hombre se concibe no como un ser que descubre el mundo sino que lo constituye.

En general, tanto Maturana como Varela son reacios a esta extensión del concepto original. Así por ejemplo Maturana considera que “aunque es indudable que los sistemas sociales son sistemas autopoiéticos de tercer orden por el solo hecho de ser sistemas compuestos por organismos, lo que los define como lo que son en tanto sistemas sociales no es la *autopoiesis* de sus componentes, sino que la forma de relación entre los organismos que los componen, y que connotamos en la vida cotidiana en el preciso momento en que los distinguimos en su singularidad como tales al usar la noción de <sistema social>" (Maturana, 1994, pág. 19). De otra forma, y hablando estrictamente, los sistemas sociales no serían sistemas autopoiéticos en tanto que no es la autopoiesis lo definitorio y esencial de dichos sistemas.

Una posición muy similar es la mantenida por Varela aunque muestre algo de mayor flexibilidad. Varela (1994) considera dos usos posibles del concepto de autopoiesis en contextos para los que inicialmente no fue pensado (especialmente en ciencias sociales). El primero, dice Varela, es una utilización literal de la idea, por ejemplo, cuando la idea de red de procesos se traduce en interacciones entre personas y la membrana celular en la frontera o borde del grupo humano. Tal utilización es abusiva según Varela por cuanto no puede considerarse a un grupo humano como un sistema autopoiético en tanto que su singularidad como tal no se halla en producirse continuamente a sí mismo. Es el mismo argumento anteriormente empleado por Maturana. El otro posible uso del concepto es lo que Varela considera una utilización por continuidad que pondría su centro de atención en tomar las ideas de autonomía, de circularidad, de autorreferencia y hacerlas extensivas a otros contextos. En lo fundamental, Varela sí se manifiesta de acuerdo con este uso.

Entre estas extensiones destacan los trabajos del sociólogo alemán Niklas Luhmann (e.g. 1984, 1995) en los que aplica el concepto de autopoiesis a los sistemas sociales y en donde la autopoiesis consistiría en la producción de las comunicaciones sociales. Con ello se caracterizaría la capacidad continua de autorreproducción gracias a la cual los sistemas sociales están definiéndose perpetuamente a sí mismos. Esta aplicación de la teoría de los sistemas autopoiéticos en la generación de una teoría de los sistemas autopoiéticos sociales ha servido para superar algunos problemas de la teoría social según Fuchs (1988) o Bailey (1997) tales como, por ejemplo, la concepción de la relación activa con el entorno. También hay que mencionar los trabajos de Erich Jantsch (1980, 1981) en los que extiende la idea de autorreproducción también fuera del campo de lo vivo formulando una teoría general de los sistemas dinámicos con la 'autoorganización disipativa' como perspectiva integradora. Jantsch considera que los conceptos de autopoiesis, de estructuras disipativas (ya vistas en este mismo capítulo) y otros como los hiperciclos y ultraciclos de Eigen, son aspectos del mismo fenómeno, fenómeno que denomina de autoorganización disipativa y que se constituye en una integración de todas estas ideas de una manera jerarquizada. Jantsch articula la doble perspectiva del fenómeno autoorganizativo alejado del equilibrio (tal y como propone Prigogine) y la del continuo mantenimiento de la autonomía del sistema con respecto al medio (idea de autopoiesis), considerando que con ello se escapa a los aspectos a menudo tautológicos a los que conduce la autopoiesis considerada en solitario como caracterización de la organización de lo vivo.

Hay que decir que Maturana ha manifestado su desacuerdo expreso con cada una de estas dos extensiones (ver Maturana, 1994; y Jantsch, 1981).

También, y para finalizar, hay que mencionar las extensiones realizadas al contexto organizativo por Gareth Morgan en sus 'Imágenes de la Organización' o por

Kickert (1993), trabajos cuyas ideas principales rescataremos en el próximo capítulo. En ambos casos, las aportaciones de la consideración de las organizaciones como sistemas autopoiéticos van en la línea de la importancia de la nueva consideración de las relaciones organización-ambiente de cara a la evolución de las organizaciones y con vistas a la gestión de las mismas.

En este sentido, y retomando la segunda aportación apuntada por Kickert referida a la nueva forma de entender el auto-gobierno en los sistemas autopoiéticos, la propuesta es que un sistema organizacionalmente abierto es posible de ser gestionado, y, por consiguiente, gobernado, desde fuera. Por el contrario, un sistema que sea organizacionalmente cerrado solo es posible de ser gobernado desde su interior. Al estar caracterizados por su autonomía, circularidad y autorreferencia, los sistemas autopoiéticos solo pueden ser gobernados desde sí mismos.

Como puede verse, el concepto de autopoiesis, con los matices introducidos, es perfectamente compatible con la idea de autoorganización que nos han apuntado otras teorías de la complejidad. La autoorganización es un resultado de la emergencia de un orden constitutivo del sistema y como tal participa de las propiedades autopoiéticas de autonomía y clausura operacional. El propio Prigogine llega a afirmar que en el desarrollo del orden por fluctuaciones que conducen a las estructuras disipativas “es sorprendente que, independientemente del sistema, el medio externo siempre desempeña igual papel y trata de eliminar la novedad que lo perturba. Esta novedad sólo puede desarrollarse en la medida en que el mundo externo pierda importancia” (Prigogine, 1993, pág. 94). Por ello, los sistemas alejados del equilibrio, en el borde del caos, maximizadores de la capacidad de procesar información, son capaces de generar estructuras y rebelarse contra las condiciones que les pueda imponer su entorno. Esta es la idea clave de la autoorganización como proceso distinto al de la adaptación en el que la teoría general de sistemas más clásica había puesto un mayor énfasis.