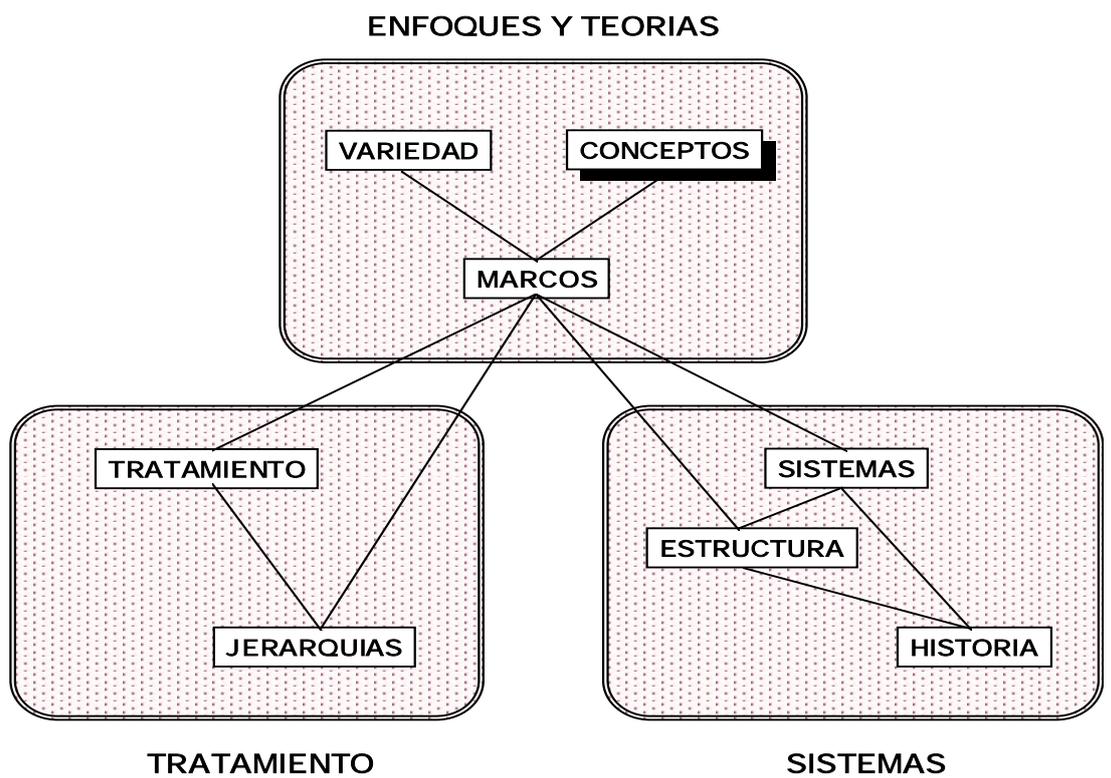
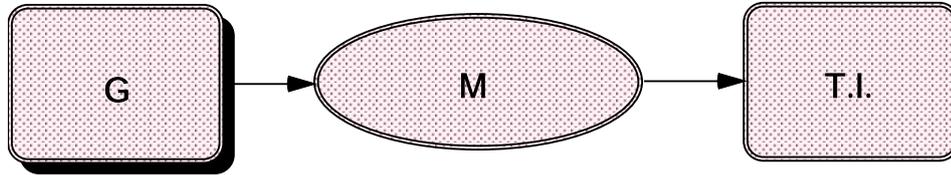


Conceptos relacionados con la complejidad

Introducción
Caos
Azar
Incertidumbre
Complejidad y Complicación
Complejidad y Desorden
Complejidad y Redundancia
Resumen
Bibliografía

El estudio de la complejidad comenzó hace ya algunos años pero sólo recientemente se han empezado a investigar ciertos fenómenos directamente relacionados con ella. La ciencia, tradicionalmente apegada a las linealidades y al determinismo, no parecía aceptar la existencia de comportamientos capaces de refutar muchas teorías establecidas. El Azar, por ejemplo, se ha considerado a menudo como una forma de referirse a lo que no podemos explicar, no como algo intrínseco a la propia Naturaleza. Relacionados con la complejidad, existen muchos conceptos como el caos, el azar, la redundancia o la complicación, a los que se está prestando creciente atención en campos tan diversos como la teoría de circuitos o la meteorología. Muchas de las conclusiones a las que se llega son las mismas que se deducen del estudio de la complejidad.



1. Introducción

La complejidad es un término genérico que como ya hemos visto es difícil de definir. Sin embargo hay multitud de otros conceptos que nos son más cercanos y más intuitivos y nos pueden ayudar a tener una idea más clara de lo que es realmente la complejidad.

Ya hemos tratado las fuentes de complejidad. En este capítulo vamos a tratar de desarrollar algunas ideas sobre una serie de conceptos que están muy relacionados con ella pero que deben distinguirse como tales conceptos para evitar confusiones. Por otro lado no hay que olvidar que intentamos estudiar la complejidad para poder abordarla mejor y para ello no hay medio mejor que conocer de donde procede y las características más destacadas de los factores que la producen.

2. Caos

La ciencia tradicional se basa en una serie de aproximaciones que por lo extendidas aparecen como características propias de la Naturaleza en lugar de lo que realmente son, suposiciones que nos permiten modelar el comportamiento de la naturaleza para poder estudiarlo y reproducirlo bajo condiciones controladas y conocidas. Una de estas suposiciones es el comportamiento lineal de los parámetros y de las características relevantes de los procesos naturales. La máxima "iguales causas producen iguales efectos" es una idea extendida basada en la necesidad de un determinismo científico. Sin embargo esa idea encierra varias suposiciones cuestionables.

La primera de ellas y más importante es el término "iguales" que supone que somos capaces de establecer las mismas condiciones, exactamente las mismas, para poder obtener los mismos efectos. Hablar de "iguales causas" es lo mismo que poder establecer las condiciones iniciales con precisión infinita, algo que no es posible. Más adelante volveremos sobre este punto cuando tratemos del azar, aquí lo que nos interesa es la combinación de esa falta de precisión con las no linealidades. La no linealidad es una de las fuentes clásicas de complejidad (Véase capítulo "Marcos Conceptuales").

La clave del caos, o más exactamente de la ciencia del caos, es reconocer que las no linealidades son una norma común de la Naturaleza y estudiarlas como tales, no intentando imponer condiciones simplificadoras. La dificultad estriba en que disponemos de muy pocas herramientas matemáticas para poder tratar con no linealidades, hasta tal punto que sólo somos capaces de resolver las ecuaciones no lineales más sencillas y se conocen algunos métodos de resolución, aplicables a pocos casos, consistentes en linealizar las ecuaciones. En consecuencia, al no disponer de herramientas ni de teorías que las pudieran explicar, las no linealidades se han evitado por principio en casi todos los estudios. Fenómenos como las turbulencias, las tormentas, los láseres, ciertas reacciones químicas, los cambios de estado o la evolución atmosférica se han tratado durante mucho tiempo dejando de lado lo que más tarde ha resultado ser la esencia de su comportamiento: la no linealidad.

Ésta es sin duda una fuente muy importante de complejidad. La aportación que ha hecho la teoría del caos es reconocer la existencia de esta fuente como algo común no como una rara excepción. Además ha contribuido a llegar a algunas consecuencias con amplias repercusiones. Un ejemplo de ello, que ya hemos visto anteriormente, es la predicción del tiempo atmosférico. Durante muchos

Los más entusiastas de la ciencia del caos llegan a afirmar que el siglo XX se recordará por tres cosas: la relatividad, la mecánica cuántica y el caos. Este último, dicen, supone un cambio radical en la concepción de la ciencia y en la forma de ver el mundo.

Históricamente el estudio del caos es relativamente reciente, aunque presente en muchos experimentos científicos conocidos, no se disponía hasta hace poco del lenguaje capaz de expresar lo que mostraba la experiencia. Preguntas como ¿qué es una turbulencia?, ¿por qué existe el orden? o ¿qué sentido tienen las no linealidades?, solían estar fuera del campo de estudio de la ciencia "oficial". No fue hasta la década de los 70 que los científicos empezaron a interesarse por este tipo de fenómenos, y fue aún mucho más tarde cuando se empezó a reconocer el valor de estas teorías.

Como en otros muchos avances de la ciencia, el reconocimiento del caos surge de la aportación de diversas personas desde campos muy diferentes. Mitchell Feigenbaum, físico que desarrolló parte de los pilares básicos de la ciencia del caos, Edward Lorenz, del MIT, primero en observar y destacar el comportamiento impredecible de la atmósfera, Stephen Smale, de la universidad de Berkeley, estudioso de la topología aplicada a sistemas dinámicos y que proporcionó la base matemática para entender ciertas propiedades caóticas, Phillip Marcus, astrónomo en la universidad de Cornell, que reconoció la estructura caótica de la Gran Mancha Roja de Júpiter, Robert May, biólogo que estudió las propiedades no lineales de la ecuación que tratamos en este apartado, Benoit Mandelbrot, matemático de IBM padre de los fractales que han servido como ejemplo y medio gráfico para mostrar el caos, Harry Swinney y Jerry Gollub, que estudiaron la transición de fase entre líquido y vapor y el origen de las turbulencias en fluidos, David Ruelle y Floris Takens, descubridores de los "atractores extraños", fundamentales en el estudio del caos, Michel Hénon, que profundizó en el estudio de los atractores, Joseph Ford y Giulio Casati, que organizaron el primer congreso sobre la ciencia del caos, etc.

años se ha estado investigando para establecer los principios que rigen el comportamiento de la atmósfera y así poder predecirlo. En la base de esta investigación está la idea ya comentada: iguales causas producen iguales efectos. Si se conocen las causas que provocan los diferentes procesos atmosféricos, lluvia, nieve, sol, anticiclones, tormentas, tornados, tifones, huracanes, altas y bajas presiones, etc, bastará con detectar esas causas para concluir qué efectos se van a producir. Disponiendo además de la potencia de cálculo adecuada, hecho que merece una mención especial pues ha conducido, en parte, a los ordenadores paralelos, y del conocimiento necesario, no habría problema para predecir el tiempo.

La ciencia del caos puso fin a esta versión del cuento de la lechera. La atmósfera es un sistema altamente no lineal, donde las condiciones iniciales juegan un papel muy importante pues la más mínima desviación en esas condiciones conduce a efectos totalmente distintos. Esto se conoce por el efecto mariposa y tiene como consecuencia más inmediata que el tiempo no es predecible a largo plazo. Las perturbaciones incontroladas que van apareciendo provocan pequeñas desviaciones del comportamiento previsto, desviaciones que se van acumulando hasta llegar a un punto en que el

comportamiento es totalmente diferente. La imposibilidad de conocer todas esas perturbaciones, y mucho menos con precisión infinita, hace imposible que podamos establecer predicciones seguras.

La importancia de esas desviaciones en el comportamiento frente a cambios mínimos en las condiciones iniciales es difícil de entender debido a la "deformación" que nos hace considerar las cosas como esencialmente lineales. El caos no son ligeras variaciones, es la alteración de la propia esencia del comportamiento de un sistema. Hay un ejemplo, clásico ya en la teoría del caos, que ilustra muy bien este hecho:

Una ecuación muy utilizada para modelar la evolución de poblaciones de seres vivos es $Y = r * X * (1 - X)$ donde X es la población inicial e Y la población resultante, r es un parámetro para ponderar esa relación. El término $(1 - X)$ evita que esa relación sea estrictamente creciente e intenta reflejar el hecho de que una población muy elevada tendrá problemas para encontrar alimento o espacio y por tanto no crecerá tanto.

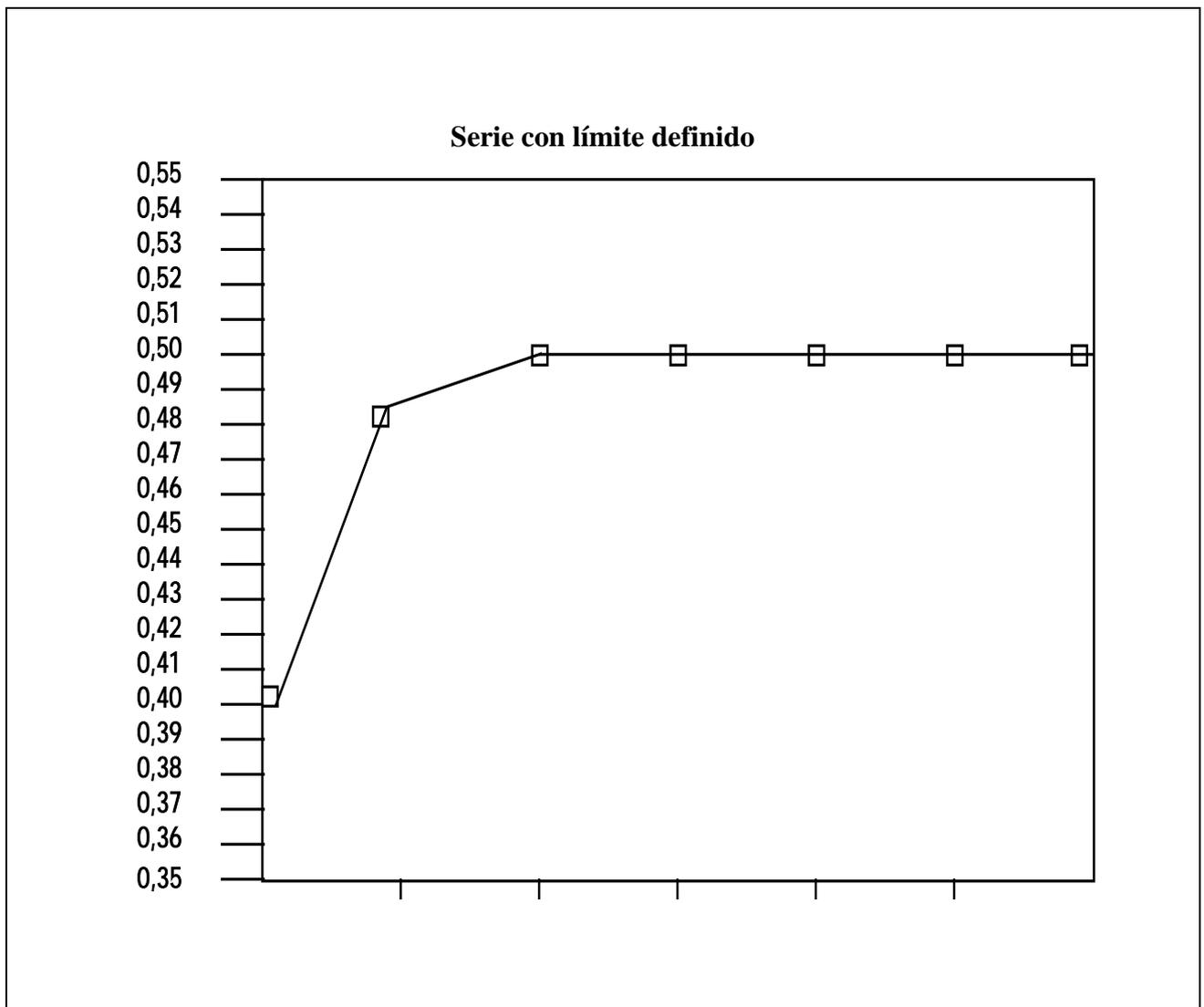


Fig 1. La ecuación tendiendo a un valor final estable

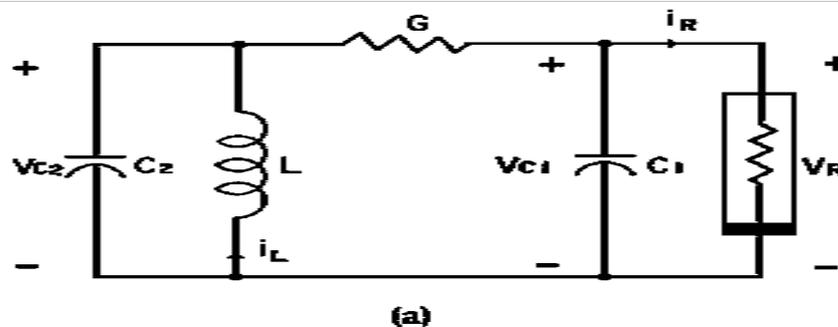
En una primera aproximación se puede suponer que la aplicación iterativa de esa ecuación tenderá a estabilizarse, por ejemplo para $r = 2$ y con una población inicial de 0.4 la serie es (figura 1):

0,4 0,48 0,4992 0,499987 0,5 0,5 0,5 ...

Caos y circuitos electrónicos

Durante mucho tiempo se han asociado las nociones de periodicidad y oscilación por un lado y las de ruido y no determinismo por otro. Esto es lo que se enseña tradicionalmente en las escuelas de ingeniería. Sin embargo, la evidencia ha empezado a demostrar que las oscilaciones no tienen por qué ser siempre periódicas y el ruido puede aparecer en un circuito determinista.

El circuito que aparece en la figura es uno de los más simples que muestran un comportamiento caótico. El único elemento no lineal es la resistencia dependiente de la tensión V_R .



Este circuito, con una resistencia lineal, tendría un comportamiento asintóticamente estable. Sin embargo, la resistencia no lineal actúa como una realimentación de potencia al circuito oscilador (formado por C_2 y L , un circuito tanque típico), provocando el comportamiento caótico. La resistencia limita el crecimiento de la señal dando lugar a trayectorias convergentes (o, como se denomina técnicamente, a trayectorias con atractor). En la siguiente figura se recogen estas trayectorias en forma de proyecciones sobre los planos que se indican. [Matsumoto, 1987]



El comportamiento caótico no es único y exclusivo de circuitos electrónicos o de modelos matemáticos más o menos abstractos. Se ha encontrado este tipo de comportamiento prácticamente en todas las ciencias: astronomía, biología, biofísica, química, ingeniería, geología, matemáticas, medicina, teoría de plasmas e incluso en ciencias sociales. [Chua, 1987]

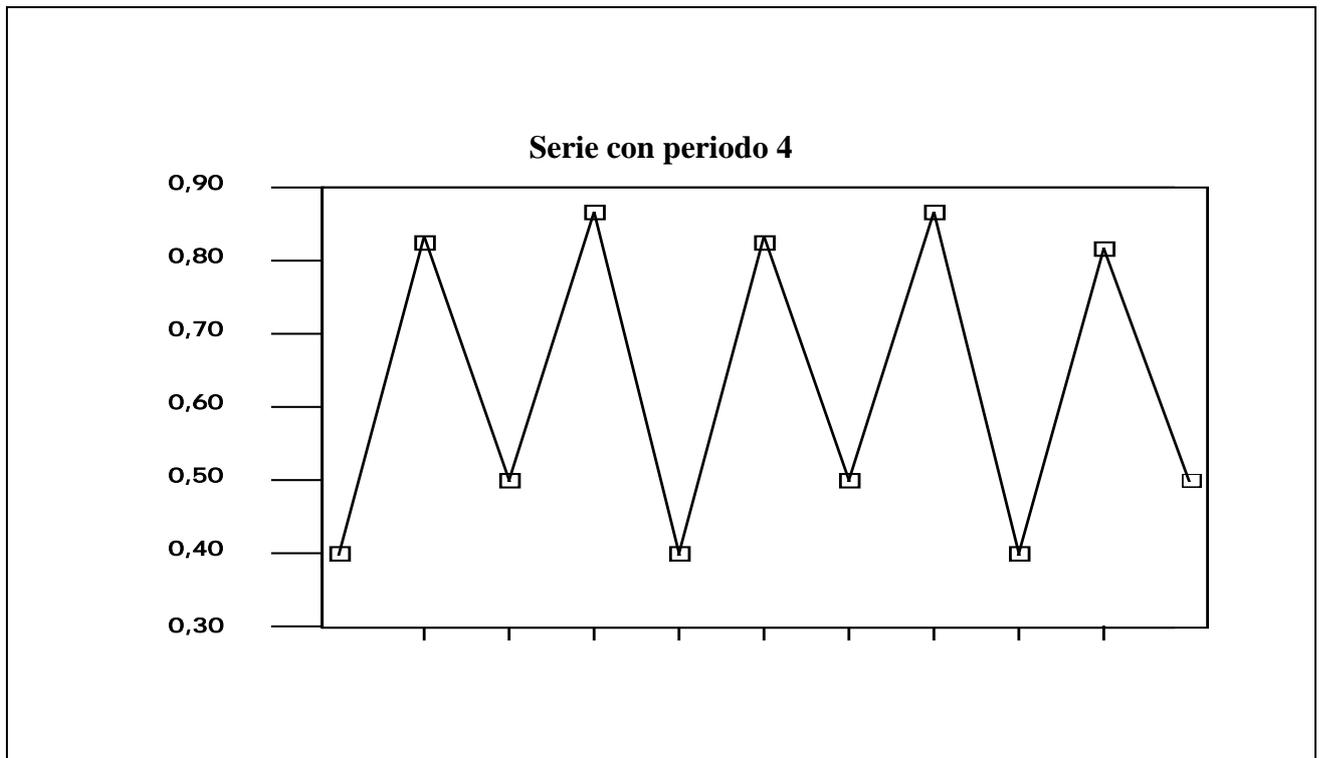


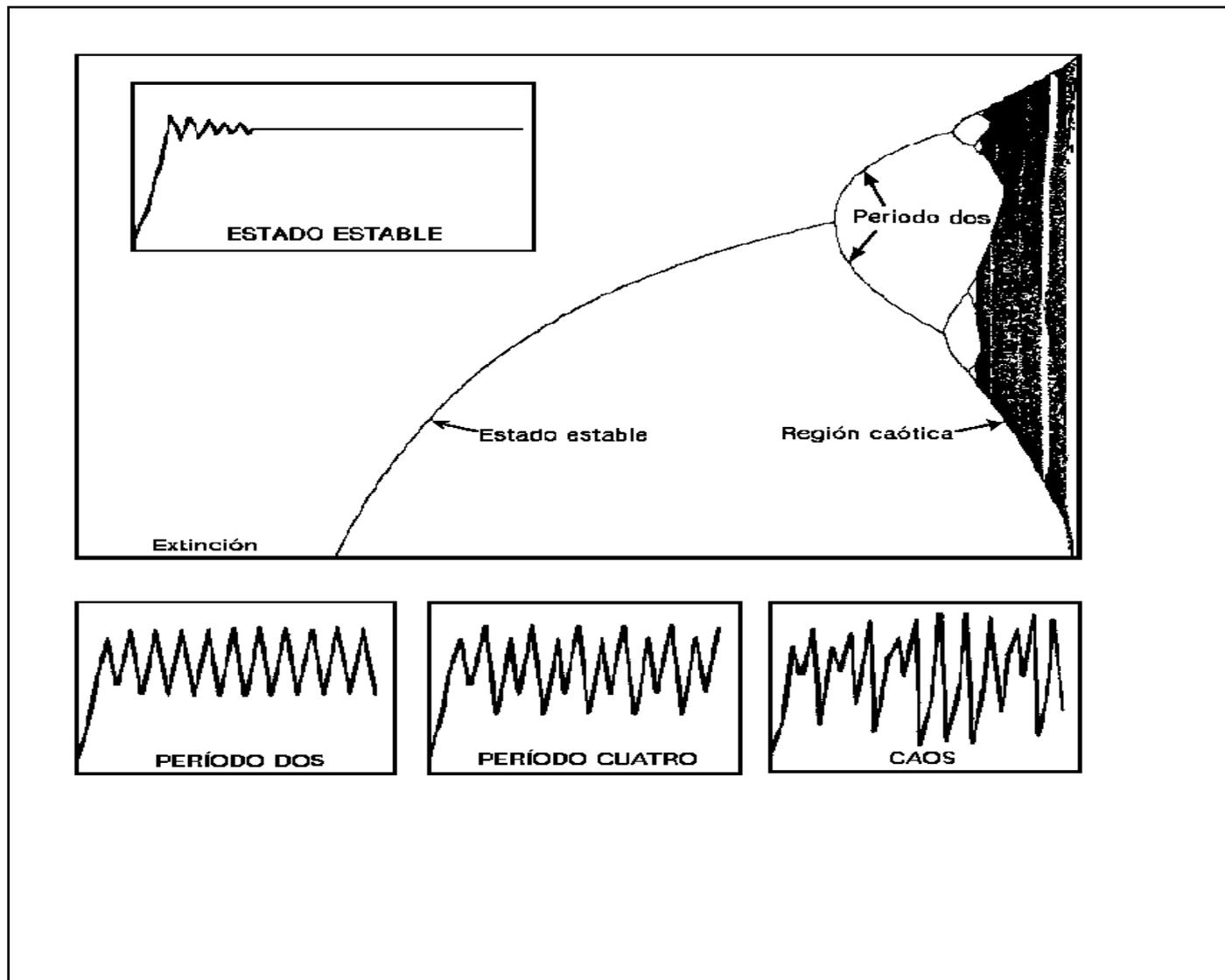
Fig. 2. La ecuación con un comportamiento oscilante de período 4

Y lo mismo sucede para cualquier valor de la población inicial. Este es el comportamiento "normal y esperado" de la ecuación. Pero si se cambia el valor del parámetro r empiezan a suceder cosas muy curiosas, para $r = 3,5$ y con una población inicial de 0,4 la serie es (figura 2):

0,4 0,84, 0,4704 0,8719334 0,3908294 0,8332862 0,4862211
0,8743355 0,3845552 0,8283539 0,497643 ...

que no tiende a ningún valor estable, y no sólo eso, sino que parece oscilar con período 4 -de hecho lo hace-. A esto es a lo que nos referimos con un cambio en la propia naturaleza del comportamiento del sistema, de un sistema estable que tiende a un punto de equilibrio, se ha pasado a un sistema oscilante. Si se varía el parámetro r se llega a otro tipo de sistemas, concretamente se pueden conseguir resultados de período 2, 4, 8, 16, 32 ... y finalmente el caos, una serie de valores que no guardan ninguna relación entre ellos.

Este asombroso comportamiento es aún más sorprendente si se considera que reaparece para diferentes órdenes de magnitud de r . Para representar esta ecuación y su comportamiento se utiliza lo que se denomina un diagrama de bifurcaciones, un tipo de representación que se ha hecho muy común en la teoría del caos. En estos diagramas se representan los valores finales a los que tiende el sistema para distintos valores del parámetro correspondiente. En este caso, para diferentes valores de r se representa un punto si la ecuación se estabiliza, dos si tiene período 2, cuatro si el período se duplica, etc. El resultado es un gráfico como el que muestra la figura 3:



*Fig. 3. Diagrama de bifurcación de la ecuación $Y = r * X * (1 - X)$, (Gleick, 1988, p. 79)*

En ese diagrama es fácil ver cómo aparece el caos para determinados valores de r . Y también la estructura repetitiva, superado un valor concreto de r el sistema deja de comportarse caóticamente y vuelve a estabilizarse, a medida que r aumenta se repite el proceso apareciendo períodos 2, 4, 8, 32, etc. En la figura 4 se muestra una ampliación de ese diagrama en la que se puede ver cómo se repite la misma estructura dentro de sí misma.

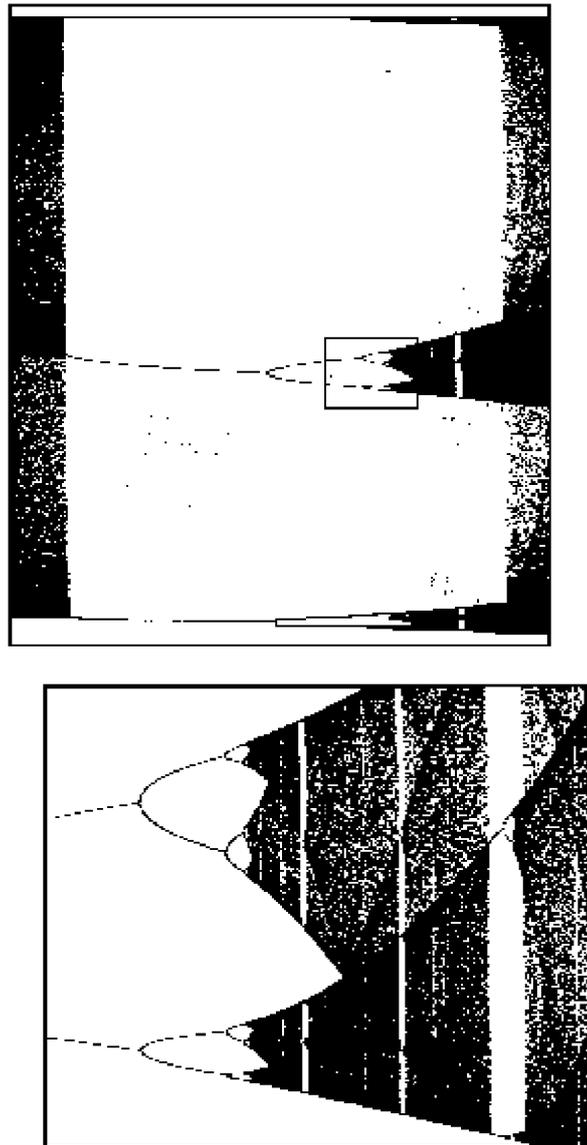


Fig.4 *Autoorganización en un sistema caótico. Al forzar el sistema aparece un período 3 que se duplica (6, 12, 24, ...) hasta desembocar en un nuevo caos; la estructura tiene profundidad infinita, [Gleick, 1988, p. 82]*

Desde el punto de vista de la complejidad, la consideración del caos es muy relevante pues pone de manifiesto la importancia de las no linealidades y la repercusión que estas tienen en el comportamiento del sistema. Un ejemplo real se recoge en el cuadro adjunto. También, como en el caso de la atmósfera, indica que hay sistemas que no son predecibles si no se conoce todos los factores que influyen en ellos, hasta el más pequeño, sin que exista la posibilidad de despreciar ninguno ya que hacerlo conduciría a una conclusión errónea. Variaciones mínimas en parámetros que tradicionalmente se han despreciado pueden producir alteraciones radicales en el resultado,

como muestra el ejemplo. Esta sensibilidad de los parámetros se convierte así en un factor fundamental en el estudio de ciertos sistemas.

De la estabilidad al crecimiento exponencial

La importancia de las interacciones entre los diferentes factores se da en todas las ramas del saber humano pero en especial en los relacionados con la sociedad. Ésta introduce tal cúmulo de factores y dependencias que dificultan en gran manera las predicciones del comportamiento. Los propios investigadores son conscientes de que la más pequeña alteración produce resultados totalmente diferentes. Ejemplo de ello es un cálculo del crecimiento de la población de los EEUU realizado en 1972. Estableciendo una media de 2 hijos por familia la población tendería a estabilizarse -unos 400 millones hacia el año 2070- pero si se asumía una media de 3 hijos por familia la población no se estabiliza en una cifra mayor -600 o 700 millones, por ejemplo- sino que se produce un crecimiento exponencial con 400 millones en el año 2015 y cerca de 1000 en el 2070. Esta variación en el comportamiento refleja la existencia de un punto crítico en el que el comportamiento se bifurca -estabilidad o comportamiento exponencial- lo que indica una complejidad del sistema mucho mayor de la que se supone a simple vista. Este fenómeno de la bifurcación es típico del estudio del caos y aparece en muchos sistemas naturales. [A partir de "Population and the American Future", N.Y., American Library, 1972, citado en Kemper, 1985].

2. Azar

En su acepción más tradicional, azar es todo aquello que escapa a nuestro control o a nuestra capacidad de predicción. En este sentido es fácil ver el azar como una fuente importante de complejidad y también como una faceta de la complejidad. Está directamente relacionado con el caos pues antes de que existieran los estudios sobre el caos todo comportamiento caótico era considerado como azar y también se puede establecer una relación muy clara entre el azar y la incertidumbre pues como muchos autores han puesto de manifiesto el azar ha sido muchas veces el velo y la excusa que cubría nuestra ignorancia sobre un determinado fenómeno. La controversia que actualmente existe sobre el azar es una de los temas más apasionantes de la ciencia.

Básicamente existen dos posiciones contrapuestas respecto al azar. La primera de ellas es la que considera un Azar, con mayúscula, un Azar "per se", ontológico, inherente a la misma Naturaleza y que por tanto es inevitable. La segunda postura pretende que el azar es sólo el resultado de la falta de conocimiento, es decir, nos resulta azaroso aquello que no conocemos pero no hay azar en las cosas que conocemos. Cada una de ellas refleja una visión diferente del mundo y de la ciencia y se pueden derivar importantes conclusiones. En la discusión sobre este punto entran en juego varias disciplinas como la teoría de probabilidades, la mecánica cuántica o la computación, pues sobre todas ellas influye el hecho de considerar el azar de una u otra forma.

En la mecánica clásica hay una serie de problemas insuperables que ponen de manifiesto, al menos, nuestras limitaciones a la hora de hacer predicciones. Uno de estos ejemplos es el péndulo. Si se sitúa el péndulo en posición vertical, por encima de su punto de suspensión, se desplazará a la izquierda si se le empuja un poco hacia la izquierda o a la derecha si se le empuja un poco a la derecha. Esto es perfectamente lógico y está de acuerdo con la mecánica clásica, pero si fuéramos capaces de colocar el péndulo en esa posición vertical con el mínimo error que nos fuera posible ¿hacia donde caería?, evidentemente unas veces a la derecha y otras a la izquierda con aproximadamente un 50 % de probabilidades de caer a un lado o a otro. La mecánica clásica no puede hacer una predicción mejor que la del 50 %, que no es tal predicción. En estos casos en los que aparece un punto crítico la certeza debe sustituirse por la probabilidad.

Existe además una mecánica estadística en la que el problema de operar con grandes números se soluciona cambiando la pregunta que se hace el investigador: de ¿qué velocidad tiene esta o aquella partícula? se pasa a ¿qué probabilidad hay de encontrar una partícula con una velocidad dentro de un margen especificado?. Se abandona la certeza para evitar la complicación del cálculo. Esto mismo es lo que hacen los meteorólogos cuando dicen que va a llover con un 30 % de probabilidades, no pueden decir más. Sin embargo, luego, o llueve, o no llueve.

La cuestión está en si esas probabilidades reflejan una propiedad intrínseca de la naturaleza, de 100 estados posibles de la atmósfera en 30 llueve, o si esas probabilidades reflejan únicamente una falta de conocimiento, se puede afirmar que lloverá con una certeza del 30 %. Aunque parezca una discusión un tanto sin sentido, elegir una u otra opción conlleva importantes consecuencias. Veamos más ejemplos.

Una de las teorías con más éxito en este siglo es la teoría cuántica. En ella no se maneja certidumbre sino sólo probabilidades. Los estados de un sistema tienen una determinada probabilidad, según la función de onda, pero nunca tenemos una certeza absoluta. El principio de incertidumbre impide que podamos hablar del estado de una partícula ya que postula la imposibilidad de conocer su velocidad y posición al mismo tiempo. Esto es muy importante pues las cosas cuando ocurren son ciertas y completas, o llueve o no llueve. En este sentido sería lógico preguntarse si, existiendo una teoría que proporciona sólo probabilidades, no sería posible encontrar una teoría X que asigne certidumbres. Por ejemplo, la probabilidad de aprobar una oposición es 0,7. Esta sería una afirmación de una teoría probabilística. Pero si estudiamos a cada uno de los que se examinan, su historial y sus aptitudes, somos capaces de decir quién pasará o quién no pasará, lo que corresponde a una afirmación de la teoría X.

Decantarse por una de las dos opciones que presentábamos al principio supone aceptar la existencia de esa teoría X o considerarla imposible. Cuando Einstein dijo aquello de que Dios no juega a los dados estaba intentando subrayar la necesidad de eliminar las probabilidades y sustituirlas por certidumbres, buscando una teoría que fuera más allá de la probabilidad cuántica.

Además, la utilización de una teoría probabilística conlleva ciertas paradojas. Una de ellas es la del gato de Schrödinger. Imaginemos una caja en la que hay un dispositivo radiactivo que se dispara en una determinada dirección y es letal sólo en esa dirección, en cualquier otra es completamente inofensivo. Al meter un gato en la caja hay unas ciertas probabilidades de que el gato esté vivo o de que esté muerto. Al abrir la caja el gato está vivo. La probabilidad se ha hecho certidumbre. La

cuestión es ¿cómo es que la probabilidad de estar vivo se ha convertido en certidumbre simplemente por abrir la caja?. La predicción de que el gato estaría vivo puede haber sido del 95 %, es decir, era una buena predicción, pero podría haber sido aún mejor.

A nivel macroscópico el azar también juega un papel importante. Supongamos un dado dentro de un cubilete. Teóricamente es posible establecer qué cara va a salir si somos capaces de calcular todos los movimientos que hará el dado de acuerdo con la forma y la fuerza con que se ha lanzado y todos los parámetros que sean relevantes. En este sentido, el lanzamiento de un dado es determinista y la probabilidad de $1/6$ asignada a cada cara sólo nos dice que no podemos en un momento dado calcular la trayectoria correcta. Pero esta afirmación presenta un problema muy interesante. En principio dice que aunque la computación sea extremadamente costosa es posible calcular qué cara va a salir, siempre y cuando la precisión con que se conocen los datos necesarios sea infinita. Aún en el ordenador más perfecto que se conoce o se pueda concebir existirá un mínimo error, suponiendo que somos capaces de conocer las condiciones iniciales con precisión infinita, y ese error conduce a una incertidumbre sobre la cara que va a salir. Cualquier conocimiento finito conduce a una probabilidad de cada cara de $1/6$.

De nuevo se nos plantea el mismo problema. De poder disponer de un ordenador o de la capacidad de cálculo para ello ¿podríamos establecer qué cara va a salir al lanzar un dado?. Esto implica conocer las condiciones iniciales con exactitud infinita, ¿es posible?. Y, de acuerdo con todo esto, ¿es el lanzamiento de un dado un proceso en el que interviene el Azar o su aleatoriedad es sólo función de nuestra ignorancia?.

Desde el punto de vista de la complejidad el azar es un tema muy importante. No cabe ninguna duda de que sí existen casos concretos en que el azar existe sólo en la mente del observador porque no conoce las reglas que rigen un determinado proceso. Es el caso, por ejemplo, de las secuencias pseudoaleatorias que se utilizan en computación. Para cualquier usuario esas secuencias aparecen como aleatorias y sin embargo están generadas por un proceso completamente determinista. Y también es una tendencia muy humana el atribuir al azar todo aquello que no podemos conocer, todo lo que escapa a nuestra ciencia. En este sentido el azar es una complejidad superable a través de una profundización en los mecanismos de comportamiento de una sistema. Pero si se admite la existencia del Azar con mayúscula también se ha de admitir una complejidad inabordable en las cosas. En cualquier caso y al igual que sucede con la complejidad, el azar, con minúscula, depende del observador y no sólo de sus intereses o de la forma de percibir el objeto sino también de su capacidad y de las herramientas de que dispone para hacer frente a la variedad que se percibe en el objeto.

3. Incertidumbre

En lo que atañe a la complejidad la incertidumbre es una de las mayores fuentes con que nos podemos encontrar y también una de las más comunes. En cierta forma engloba al caos y al azar pues que se produzcan fenómenos caóticos o azarosos que se traducen en incertidumbre respecto al objeto con que se trata. Pero el caos y el azar tienen un significado concreto mientras que la incertidumbre es algo más bien intuitivo y sin formalizar, al menos en la mayoría de los campos de estudio.

Al tirar un dado se produce una incertidumbre sobre el resultado que saldrá, una turbulencia introduce incertidumbre sobre el comportamiento de un fluido, pero un tipo de incertidumbre que se deja generalmente de lado al no tener herramientas que permitan manejarla. La mayor formalización sobre la incertidumbre se ha hecho en el campo de la representación del conocimiento y en la inteligencia artificial, donde es necesario reflejar esta realidad de las representaciones que el hombre fabrica de los objetos que le rodean. Así, siguiendo a Klir [Klir, 1988], podemos definir y clasificar la incertidumbre como sigue:

En una primera aproximación incertidumbre tiene un significado amplio que abarca diferentes conceptos resumibles en seis puntos:

- 1.- Conocimiento sin seguridad, cuestionable, problemático
- 2.- Vago, sin definir o determinar
- 3.- Dudoso, falta de algún conocimiento, no seguro
- 4.- Ambiguo
- 5.- No fijo, no constante, con variaciones
- 6.- Con tendencia a cambiar o variar, falta de fiabilidad o seguridad

Estos seis puntos son muy amplios y se pueden relacionar con las definiciones de complejidad que hemos visto, especialmente con la definición de Sáez Vacas, con la que guarda un paralelismo muy curioso, lo que indica la estrecha relación que hay entre la complejidad y la incertidumbre. Discutir cuál es la causa y cuál es el efecto es un círculo vicioso en el que no pretendemos entrar, sólo queremos subrayar que la incertidumbre genera complejidad y la complejidad, incertidumbre.

El conocimiento incompleto de un objeto, la ambigüedad, la falta de fiabilidad o la vaguedad son ideas que están fuertemente ligadas a la noción de complejidad y, al igual que el azar, se pueden relacionar directamente con la complejidad vista como la diferencia de variedades entre observador y el objeto. Y, como el azar, la incertidumbre está asociada al observador nunca al objeto, algo evidente nada más echar un vistazo a los seis puntos anteriores.

Por otro lado, y de acuerdo con Klir [Klir, 1988] esos seis puntos pueden agruparse en dos categorías diferentes: vaguedad y ambigüedad. Por vaguedad se entiende la dificultad de hacer distinciones claras y precisas, la falta de límites concretos. Ambigüedad es más la dificultad de elegir entre varias opciones y está directamente relacionada con las relaciones uno-a-varios.

Cada una de estas categorías lleva asociados varios conceptos similares pero que matizan más su significado concreto. La siguiente lista resume algunos de estos conceptos:

VAGUEDAD

Borrosidad
Falta de claridad
Falta de distinciones
Falta de definición
Falta de limitación

AMBIGÜEDAD

Falta de especificidad
Diversidad
Generalidad
Divergencia
Relaciones uno-a-varios

Algunos de ellos se utilizan profusamente en la literatura técnica, especialmente el de borrosidad. Dentro de la ambigüedad también se pueden distinguir algunas categorías:

- 1.- Ambigüedad en la caracterización de un objeto (falta de especificidad), por ejemplo, decir que alguien es alto no es decir mucho, pues el conjunto de las personas altas es muy amplio y a medida que sea más grande ese conjunto, menos caracterizado estará un elemento que pertenezca a él.
- 2.- Ambigüedad en la pertenencia a una o otra categoría (disonancia en la evidencia), que sucede frecuentemente cuando nos enfrentamos a dos opciones entre las que hay que elegir.
- 3.- Ambigüedad originada por la multitud de opciones (confusión en la evidencia), cuando las opciones son pocas se habla de disonancia cuando las opciones son muchas introducen su propia ambigüedad al producirse múltiples evidencias al mismo tiempo.

Todos estos matices son muy interesantes cuando se estudia el comportamiento de sistemas pues no es lo mismo enfrentarse con la complejidad que genera un problema mal definido, vago, que la que genera un problema ambiguo, que tiene múltiples soluciones. A la hora de abordar un problema, y por tanto tratar la complejidad que genera, es fundamental identificar cuáles son las fuentes de complejidad que están presentes.

4. Complejidad y complicación

Hay una serie de conceptos que tradicionalmente se asocian con la complejidad hasta el punto de considerarse casi sinónimos. Uno de ellos es la complicación, una característica peculiar de determinados sistemas que debemos distinguir de la complejidad. No cabe duda de que la complicación origina complejidad pero resulta también obvio que no todo lo que es complejo es complicado.

La complicación es un atributo de sistemas artificiales construidos por el hombre que, además, conoce y comprende totalmente su funcionamiento y su estructura [Atlan, 1979]. Lo cual no quiere decir no que tengan errores, simplemente se pretende destacar que son sistemas artificiales en contraposición a sistemas naturales como pueden ser una célula o un organismo vivo. En estos últimos no cabe hablar de complicación sino de complejidad, sin embargo, en una máquina, un ordenador por ejemplo, si se puede hablar de complicación. En este sentido, la complejidad de un algoritmo parte de su grado de complicación. Y es importante no confundirse en este punto. La complicación de un algoritmo se puede medir, por ejemplo, según el número de instrucciones que se necesitan para describirlo en una máquina y con un lenguaje estándar, por ejemplo una máquina de Turing. Según esto, un algoritmo con más instrucciones será más complicado que uno con menos. La complejidad está relacionada con el grado de complicación pero no sólo con él. La complejidad del algoritmo aparece cuando empezamos a considerar parámetros que de alguna manera no dependen directamente del algoritmo, interacción con otros algoritmos, recursos limitados, expresividad del lenguaje de programación, tiempos de computación, características particulares de

la máquina donde se ejecuta, optimización del compilador, prevención de errores y fallos, estilo de programación, etc.

La complicación aparece en sistemas en los que conocemos su funcionamiento y su estructura, una diferencia fundamental con la complejidad. El ejemplo del algoritmo es muy claro. De él sabemos lo que hace, clasificar palabras, buscar etiquetas, establecer rutas de comunicación o intercambiar páginas de memoria, y cómo lo hace, su estructura, ventajas y desventajas, supuestos de partida y limitaciones. De acuerdo con ello el algoritmo será más o menos complicado. La complejidad es el resultado de eliminar la abstracción en ese algoritmo y pasar a implementarlo, momento en el cual aparecen todos los condicionantes que antes mencionábamos.

Complejidad algorítmica

La Algorítmica es uno de los campos de estudio más avanzados de la complejidad, tanto es así que en gran parte de las universidades americanas el estudio de la complejidad algorítmica se conoce simplemente por estudio de la complejidad. Dentro de ella se estudian temas tan interesantes como los límites de la computación (cuanta información se puede computar), tiempo de computación de cada algoritmo, tipos de problemas, problemas no resolubles, explosiones combinatorias, etc. Sobre este tema volveremos más adelante cuando tratemos la complejidad del software.

5. Complejidad y desorden

El desorden se puede tratar de muchas maneras, una de las más utilizadas es la entropía. Intuitivamente se suele relacionar el orden con la ausencia de complejidad o al menos con una disminución de ésta. El orden ayuda a entender la estructura y el comportamiento de un sistema y por tanto a hacerlo menos complejo. Pero de ello no se puede deducir que todo desorden implique complejidad. Un gas es un objeto muy desordenado pero ello no implica que sea necesariamente complejo pues podemos tratar ese desorden de forma estadística porque nos conformamos con un cierto conocimiento global, es decir, consideramos la complejidad de una cierta situación. Sobre esta cuestión volveremos en capítulos posteriores. Este hecho ya fue estudiado por Weaver cuando propuso una clasificación de la complejidad en la que consideraba una complejidad desorganizada aquella en la que el grado de desorden y el elevado número de elementos permitían un tratamiento estadístico (ver en Marcos Conceptuales).

Un sistema complejo presenta un desorden que podríamos llamar virtual, un desorden aparente que oculta un orden subyacente. El movimiento de los planetas se consideraba desordenado, o aleatorio, mientras no se estableció una teoría que lo explicase. La complejidad puede verse entonces como un orden del que no conocemos la clave [Atlan, 1979]. Esto nos permite enlazar con los conceptos que antes veíamos. El desorden está íntimamente ligado a la noción de azar, el azar produce desorden y lo desordenado es aleatorio. Podemos hacernos entonces la misma pregunta que nos hacíamos antes, ¿es el desorden una característica propia de la Naturaleza o sólo un nombre con el que subrayamos nuestra incapacidad para encontrar el orden que hay en todas las cosas?.

Siguiendo la propuesta de Atlan, la complejidad como un orden desconocido, entramos de lleno en el terreno de la incertidumbre que podría interpretarse como una medida del desconocimiento que tenemos de un determinado orden. Lo que no conocemos aparece como desordenado, aleatorio y aumenta nuestra incertidumbre sobre su comportamiento. El orden, por el contrario, implica una pauta, unas normas, una estructura que rige en todo momento y que permite reducir esa incertidumbre, abandonar el caprichoso azar y reducir por tanto la complejidad.

6. Complejidad y redundancia

Este es el último de los conceptos que vamos a estudiar aquí y nos va a servir fundamentalmente para relacionar los anteriores entre sí. La redundancia consiste en que el conocimiento de un elemento nos aporta una cierta cantidad de información sobre los demás elementos del sistema. Este hecho nos lleva a una conclusión muy interesante: si hay redundancia percibimos un cierto orden. La repetición de una determinada pauta permite evitar el desorden del que antes hablábamos y por tanto reduce la incertidumbre, la aleatoriedad y finalmente la complejidad.

La redundancia puede verse entonces como una medida de la simplicidad y el orden. Y en principio podría considerarse que la redundancia reduce la complejidad si no fuera porque implica un aumento de la complicación cerrándose así un círculo que nos relaciona estos tres últimos conceptos. La redundancia permite establecer un cierto orden y reducir la incertidumbre pero conlleva un aumento considerable de la complicación. Será, pues, un problema de compromiso elegir el grado de redundancia que nos permite establecer una pauta pero no aumenta en demasía la complicación del sistema.

Hay una serie de ejemplos muy interesantes que ilustran un serie de características de la redundancia que nos pueden servir muy bien para cerrar la discusión sobre todos estos conceptos. El primero de ellos son los arabescos, una decoración en la que unos pocos patrones sencillos se repiten una y otra vez formando estructuras muy complicadas. En este caso la redundancia no está tan relacionada con la información pero sí con una repetición física de un motivo único un gran número de veces. La complicación en el resultado y el desconocimiento de las pautas seguidas por el artista para establecer las reglas según las cuales se repiten los motivos dan lugar a la complejidad que percibe el observador. Sin entrar en mayores profundidades, lo que dijimos de la complicación también vale aquí, la redundancia en sí no implica complejidad, es la interacción con elementos ajenos la que genera esa complejidad. En el caso de los arabescos hay una serie de teorías que sostienen que los patrones seguidos se basan en conceptos abstractos y espirituales que dictan las normas y las pautas a seguir y que, en lo que a nosotros nos interesa, son los que introducen la complejidad en esos arabescos.

Otro ejemplo son los fractales, estructuras redundantes por excelencia, y que cualquiera que haya tenido la oportunidad de contemplar imágenes de fractales como el conjunto de Mandelbrot puede atestiguar la complicación que hay en ellos. Complicación que se transforma en complejidad cuando no conocemos el algoritmo, generalmente muy sencillo, que ha servido para trazarlo.

7. Resumen

Podíamos extendernos mucho sobre cualquiera de los seis conceptos que hemos tratado en este capítulo. Algunos de ellos, como el caos o el azar, son temas de candente actualidad y sobre los que se han escrito libros enteros. Evidentemente aquí no podemos ni pretendemos hacer lo mismo puesto que nuestro principal objetivo es el estudio de la complejidad.

En función de ésta, azar, caos, incertidumbre, redundancia, complicación y desorden aparecen como su origen. Es decir, se pueden ver como fuentes de complejidad que podemos añadir a las que habíamos considerado anteriormente. Pero lo más destacado de ellas es que están profundamente interrelacionadas y es difícil hablar de una de ellas sin mencionar a las demás. La incertidumbre y la complicación son las que más directamente se relacionan con la complejidad y en este sentido conviene recordar el paralelismo que existe entre la definición de incertidumbre de Klir y la definición de complejidad de Sáez Vacas. Por otro lado, el azar es quizá la idea más cercana a cualquiera y también la más intuitiva pero podemos subordinarla de alguna forma a la incertidumbre.

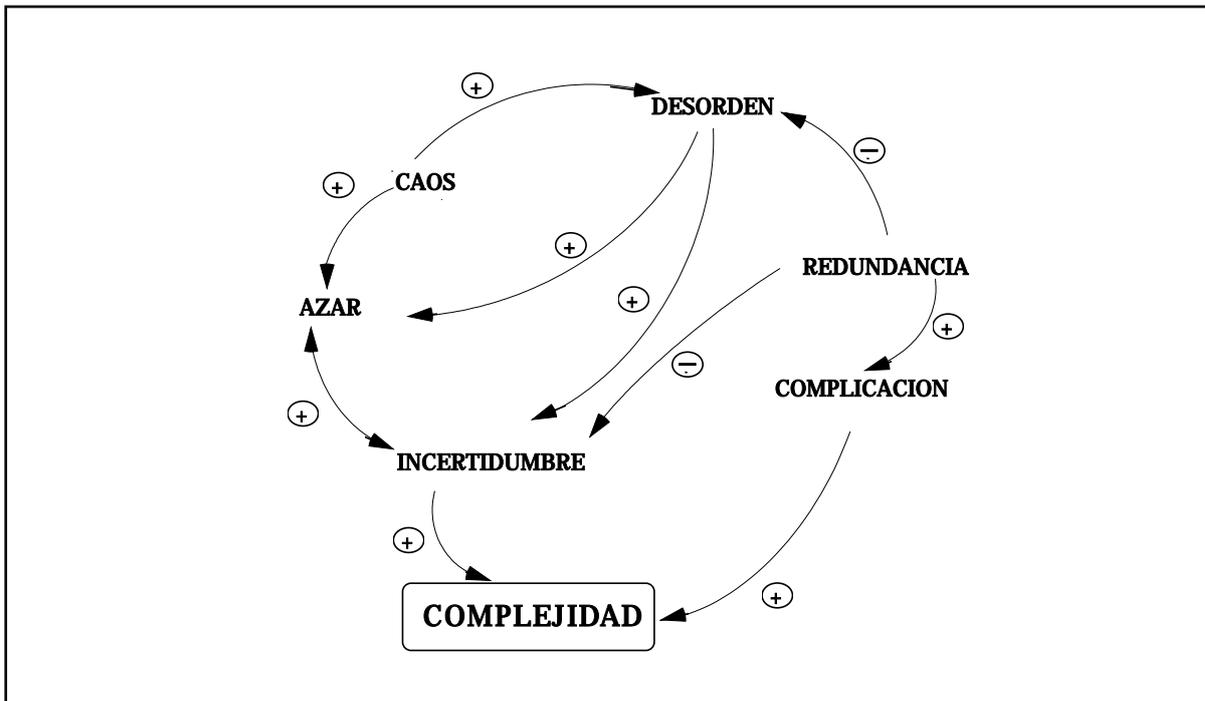


Fig. 6. Cuadro de relaciones entre los seis conceptos estudiados en este capítulo.

Como resumen de todo esto podemos pensar en un diagrama como el que muestra la figura 6 en el que hemos intentado reflejar las relaciones entre los conceptos estudiados. Las flechas llevan un signo + ó - según que la presencia de una de estas características conduzca a aumentar o disminuir la presencia de otra. Por ejemplo, la aparición de fenómenos caóticos implica un aumento de desorden, la existencia de redundancia implica una disminución del desorden y un aumento de la complicación, etc.

Queda aún mucho campo de estudio en lo referente a estos temas. El caos se produce generalmente de forma redundante, es decir, el mismo fenómeno se produce a diferentes escalas -recordar el

ejemplo visto-, lo que introduce un factor de redundancia que sin duda ayuda a disminuir aún más el desorden. El paralelismo que existe entre la incertidumbre y la complejidad también es muy interesante desde el punto de vista conceptual y desde el punto de vista práctico algunas de las formalizaciones hechas para la incertidumbre se podrían intentar aplicar a la complejidad.

Bibliografía

Dividida en dos apartados. En el apartado de Notas Bibliográficas se comentarán aquellos trabajos que más profusamente han servido para redactar las páginas anteriores. El apartado de Referencias Bibliográficas contiene todos los trabajos citados.

Notas bibliográficas

Sobre el Caos: existe una bibliografía amplia, tanto en forma de libros como de artículos, dado que se trata de un tema de moda. En español y como obra introductoria para los que no deseen perderse en complicados formalismos matemáticos está **Caos**, de James Gleick, algo falto de rigor al estar escrito por un periodista, pero por eso mismo sencillo y ameno de leer, [Seix Barral, Barcelona, 1987]. Otro título interesante, sobre todo para aquéllos con una formación más ingenieril o científica, también en español, es **Fórmulas del éxito en la Naturaleza**, de Hermann Haken [Biblioteca Científica Salvat, Barcelona, 1986]. Existe un número de los **Proceedings del IEEE** dedicado a sistemas caóticos y es muy interesante para profundizar en el aparato matemático y teórico de las manifestaciones del caos [Proceedings of the IEEE, Agosto 1987].

Sobre el Azar: las referencias básicas que hemos utilizado son **Proceso al Azar** e **Ideas sobre la complejidad del mundo**, ambos de Jorge Wagensberg [en la colección Superínfimos de Tusquets Editores], en esta misma colección se pueden encontrar títulos muy sugerentes que no se limitan a este tema y muy relacionados con el estudio de la complejidad. "Proceso al Azar" es el resumen de una serie de conferencias pronunciadas durante un encuentro en Figueras, que reunió a importantes personajes de la ciencia y el pensamiento en torno al problema del azar, puede ser interesante para los iniciados en la física y las matemáticas y para los interesados en la filosofía especulativa. "Ideas sobre la complejidad del mundo" tiene un objetivo más amplio y trata muchas ideas relacionadas con la complejidad, entre ellas el azar, es relativamente sencillo de leer y con ideas muy estimulantes.

Sobre Incertidumbre: existe también una bibliografía muy amplia, aunque no directamente relacionada con los aspectos que aquí hemos tratado. La incertidumbre suele tratarse en profundidad en la mayoría de los libros sobre Inteligencia Artificial y principalmente en los que se ocupan de la lógica borrosa. El que hemos tomado como referencia **Fuzzy sets, Uncertainty and Information**, de George Klir (al que hemos citado con anterioridad por sus trabajos sobre sistemas y complejidad) resulta algo engorroso pues está orientado al estudio formal y matemático de la lógica difusa, el capítulo 5 es lo más interesante desde el punto de vista que aquí nos ocupa. Existe un artículo de Klir que puede resultar interesante y más sencillo de leer: "The role of Uncertainty Principles in Inductive Systems Modelling" [Kybernetes, 17, 2], gran parte de lo que aparece en este artículo constituye el capítulo 5 del libro anteriormente citado.

El resto de los conceptos que hemos tratado se encuentra muy disperso en la bibliografía, por ello nos limitaremos a dar sólo algunas ideas sobre referencias que tocan estos temas, aunque ninguna lo hace en exclusiva. La utilizada como referencia directa en este capítulo es **Entre le cristal et la fumée**, de Henri Atlan, en francés (hay traducción al español), un libro donde aparecen muchas ideas sobre sistémica y complejidad. Otro libro interesante pero difícil (existe versión en español), premio Pulitzer, es **Gödel, Escher, Bach: An eternal golden braid**, de Douglas, R. Hofstadter [Basic Books, Nueva York, 1979]. Otro libro interesante como ejemplo de la complejidad conseguida a través de formas simples puede ser **Las formas del color**, de Karl Gerstner [Hermann Blume, Madrid, 1988].

Referencias bibliográficas

Atlan, H. (1979) **Entre le cristal et la fumée, essai sur l'organisation du vivant**, Editions du Seuil, Paris, (hay traducción al español).

Gerstner, K. 1988 **Las formas del color**, Hermann Blume, Madrid.

Gleick, J. (1987) **Caos**, Seix Barral, Barcelona.

Haken, H. (1986) **Fórmulas del éxito en la naturaleza**, Biblioteca Científica Salvat, Barcelona.

Hofstadter, D.R. (1979) **Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid**, Basic Books, Nueva York, (hay traducción al español).

Klir, G.J.(1988) **Fuzzy sets, Uncertainty and Information**, Prentice-Hall International, 1988.

Klir, G.J. "The role of uncertainty principles in Inductive Systems Modelling", **Kybernetes**, 17, 2, pp. 24-34.

Proceedings of the IEEE (1987), Agosto.

Wagensberg, J. (1986) **Proceso al Azar**, Colección Superínfimos de Tusquets Editores, Barcelona.

Wagensberg, J. (1985) **Ideas sobre la complejidad del mundo**, Colección Superínfimos de Tusquets Editores, Barcelona.