

# El funcionamiento y la interacción de la inteligencia humana como sistema complejo de la naturaleza.

Dr. Francisco Collado Roura.  
Médico. Especialista en Medicina Legal y Forense.  
Perito Judicial.

---

## 1. Introducción.

El libro *Estructuras de la Mente* se hizo mundialmente famoso en 1981 al publicar su autor, Howard Gardner de la Universidad de Harvard, su célebre *Teoría de las Inteligencias Múltiples*.

La verdadera transcendencia científica de esta obra, incluso de la obra científica de Howard Gardner en su conjunto, es la conclusión que de sus estudios alcanzó y publicó en este libro acerca de la naturaleza de la inteligencia humana que definió de la siguiente forma:

***“potencial biopsicológico de procesamiento de la información”.***

No cabe duda de que lo biopsicológico pertenece al ámbito conceptual y legal de lo clínico no patológico, lo que sitúa estos factores constitutivos de la inteligencia humana -con sus capacidades y talentos- en un nuevo ámbito científico y por tanto en la multidimensionalidad.

Poco a poco, diferentes autores, en España, entre otros, la Catedrática de Psicología Evolutiva y de la Educación Dra. Sylvia Sastre, de la Universidad de La Rioja, irán llenando de contenido este nuevo paradigma. Esta prestigiosa científica comienza por denominarlo: *“Paradigma Emergente”*, en sus fundamentales artículos científicos, algunos de ellos publicados en la Revista Neurología <https://altacapacidades.es/portalEducacion/html/articulos/articulosdrasilvia.html>

La Doctora Sylvia Sastre inicia estos artículos científicos en el 2008 con el titulado: *“NIÑOS CON ALTAS CAPACIDADES Y SU FUNCIONAMIENTO COGNITIVO DIFERENCIAL”*. Y lo hace tomando la inteligencia humana como marco de referencia. Inicia su introducción señalando:

*“La investigación cognitiva actual gira en torno al estudio de los mecanismos de cambio cognitivo con el fin de conocer y optimizar el proceso de transformación ontogenética del sujeto promocionando su bienestar biopsicosocial, acorde con el actual concepto de salud [1]. Desde esta perspectiva, el neuroconstructivismo [2] concibe el desarrollo como un proceso de cambio ordenado y transformación sucesiva a lo largo del ciclo*

vital que afecta a todos los aspectos de la vida humana: la expresión genética, la estructura y funcionamiento cerebral, o los procesos cognitivos y de conducta, siguiendo una epigénesis probabilística [3]. Este concepto de desarrollo integra: a) la interacción entre genética y entorno [4,5]; b) el constructivismo neural que defiende la incidencia de la experiencia en la génesis de las estructuras neurales [6]; c) la especialización interactiva del cerebro [7]; d) la explicación constructivista del desarrollo típico y atípico, y e) la importancia del entorno social en el desarrollo. Desde esta perspectiva no reduccionista, la base del desarrollo cognitivo se caracteriza por cambios mutuamente inducidos entre los niveles neurales y cognitivos, que dan lugar a distintos procesos de desarrollo típico y atípico como respuesta a esta mutua interrelación, ofreciendo un marco de referencia para estudiar y explicar el funcionamiento y naturaleza de dichos cursos diferenciales con el objetivo de identificar los principios que operan en ellos [3] y la variabilidad intra e interindividual [8]”.

Resulta muy interesante observar la gran cantidad de conceptos que pertenecen al ámbito clínico que la Dra. Sylvia Sastre utiliza en tan pocas líneas para referirse a la inteligencia humana. Lo hace de la mano de los científicos de superior prestigio mundial, que, como es natural, cita en cada una de sus notas y que los correspondientes a estas primeras líneas son:

1. Organización Mundial de la Salud. Informe sobre la salud en el mundo. URL: <http://www.who.int/whr/es/index.html>. [24.05.2006].
2. Westerman G, Mareschal D, Johnson MH, Sirios S, Spratling MW, Thomas MSC. Neuroconstructivism. *Dev Sci* 2007; 10: 75-83.
3. Karmiloff-Smith A. Atypical epigenesis. *Dev Sci* 2007; 10: 84-8.
4. Haan M, Johnson MH, eds. *The cognitive neuroscience of development*. New York: Psychological Press; 2003.
5. Petrill SA, Plomin R, Defries JC, Hewitt JK. *Nature, nurture and the transition to early adolescence*. New York: Oxford University Press; 2003.
6. Quartz SR, Sejnowski TJ. *The neural basis of cognitive development: a constructivist manifesto*. *Behav Brain Sci* 1997; 20: 537-96.
7. Johnson MH. *Functional brain development in infants: elements of an interactive specialization framework*. *Child Dev* 2000; 71: 75-81.
8. Siegler RS. *Cognitive variability*. *Dev Sci* 2007; 10: 104-9.

En su artículo: “MODULADORES DE LA EXPRESIÓN DE LA ALTA CAPACIDAD INTELLECTUAL” se refiere a las Altas Capacidades, si bien lo que a su inicio señala es perfectamente trasladable a las medias o bajas capacidades, a las capacidades en general, y en definitiva a la inteligencia humana. Dice:

“La investigación reciente desmitifica y redefine la alta capacidad intelectual (ACI) frente al concepto tradicional monolítico y estático, basado en la heredabilidad e identificación mediante un alto cociente intelectual. Este concepto se sustituye por otro en el que la

*ACI es entendida como un fenómeno complejo de naturaleza genética y ambiental, multidimensional, diverso, moldeable, dinámico y en desarrollo, resultado de la covariación a lo largo de la trayectoria de vida entre fuerzas endógenas y exógenas, que van modulando y diferenciando el alto potencial (factor predictor) en competencias hacia la óptima expresión, o no, de la eminencia en la adultez”.*

La existencia de factores inherentes de carácter clínico no patológico es evidente, pero es de resaltar el concepto que utiliza al señalar **“La ACI es entendida como un fenómeno complejo de naturaleza genética y ambiental, multidimensional”**.

Sigue diciendo la Catedrática de Psicología Evolutiva Dra Sylvia Sastre en este artículo:

*“El avance de la investigación en psicología, neurociencia o genética sobre la competencia y funcionamiento intelectual, redefine el concepto de la Alta Capacidad Intelectual (ACI), más allá de la rígida y estática propuesta tradicional como rasgo monolítico y fijo hacia una perspectiva más amplia, multidimensional, contextualizada, de base genética pero esculpida por la interacción dinámica de fuerzas endógenas y exógenas que van diferenciando e integrándose en el curso del desarrollo con formas diversas”.*

Así, aparece documentación científica acumulada sobre el estudio de la inteligencia humana. Es importante señalar que la investigación científica específica sobre las especificidades de la inteligencia humana como son las Altas Capacidades, la Superdotación la Precocidad Intelectual, las Capacidades y el Talento, desde una perspectiva no reduccionista, sino científica ha sido muy importante para los avances de la investigación sobre la inteligencia humana. Desde esta perspectiva se ha comprendido que la inteligencia humana constituye un proceso de transformación ontogenética, de origen y fundamento biogenético y sustrato neurobiológico. La naturaleza y configuración de la inteligencia humana es de carácter neurobiológico, neuropsicológico, y epigenético. Sus especificidades inherentes participan por tanto de la misma naturaleza.

El interés principal de la investigación específica reside en conocer y desarrollar, en cada persona, las diferencias intelectuales cualitativas, según la especificidad o colectivo al que cada individuo pertenezca, y además según su funcionamiento cognitivo y metacognitivo diferencial de la persona; ambos factores determinan el diferente proceso educativo que cada uno necesita en la preceptiva Educación Inclusiva o personalizada.

Las repercusiones de esta redefinición de la inteligencia humana ha alcanzado de la mano de las Neurociencias resultan evidentes en diversos ámbitos, por ejemplo, en el reconocimiento e identificación de las capacidades intelectuales y talentos de los estudiantes que a partir de este momento necesita la Evaluación Multidisciplinar que señala la Convención Naciones Unidas publicada en el BOE 21 de abril de 2008 Art. 26.1, o Diagnóstico Clínico, que en todos los casos requiere, por una parte, el Modelo Biopsicosocial que se fundamenta en la CIF aprobada por la OMS en el 2001, y por otra parte equipo multidisciplinar con profesionales con la titulación clínica necesaria para poder efectuar los diagnósticos.

El interés principal de la Evaluación Multidisciplinar de las necesidades y capacidades

de los estudiantes o Diagnóstico clínico reside en conocer y desarrollar, en cada persona, las diferencias intelectuales cualitativas, su funcionamiento cognitivo y metacognitivo diferencial, que pertenece al ámbito conceptual y legal de lo clínico no patológico y que determina el diferente proceso educativo que necesita para su desarrollo, en la preceptiva Educación Inclusiva o personalizada.

Consecuencia de la existencia de los factores clínicos no patológicos inherentes a la inteligencia humana los mismos tests de inteligencia declaran su naturaleza clínica. **Por ejemplo, el más usado, el Wisc IV, en su manual oficial, página 13, declara que se trata de un instrumento de carácter clínico**, por lo que sólo puede ser usado: administrado e interpretado por aquellos profesionales que se hallen en posesión de la correspondiente titulación clínica necesaria para poder realizar diagnósticos de especificidades clínicas. (Código Penal Artículo 403)

Por su parte, la Organización Mundial de la Salud el 20 de mayo de 2001 aprobó la CIF. En su capítulo 2.1 titulado: *“Aplicaciones de la CIF”, define su propio ámbito de aplicación y competencias específicas, señalando:*

- ***“Como herramienta clínica - en la valoración de necesidades, para homogeneizar tratamientos...”***
- ***Como herramienta educativa - para diseño del "currículum".***



<https://altascapacidades.es/portalEducacion/html/otrosmedios/CIF.pdf>

La Dra. Esther Secanillas, Profesora de Psicología de la Universidad Autónoma de Barcelona en su obra *“Supermentes”* (Ed. Gedisa, 2019), en relación a las Inteligencias Múltiples señala: *“El Profesor De Mirandés (2014) señala que el concepto Inteligencias Múltiples es una expresión que utilizó Howard Gardner al publicar su libro con el objetivo de no pasar desapercibido y conseguir el máximo número posible de ventas , y al mismo tiempo para resaltar el número desconocido de capacidades y su importancia”.*

El Profesor de Mirandés desarrolló más ampliamente el tema en su conferencia en la Universidad de Zaragoza: *“La Detección y el Diagnóstico de las Capacidades o Talentos, con relación A las Inteligencias Múltiples de Gardner”*, el 4 de julio de 2016

<http://altascapacidadescse.org/LATEORIADELASIN.pdf>

Seguidamente la Dra. Secanillas añade: “Gardner confiesa que su libro: ‘Frames of Min’ nunca hubiera tenido el éxito que tuvo si en lugar de hablar de inteligencias múltiples hubiera hablado de talentos “.

Pero, lo cierto es que, tras los años transcurridos, **el fundamental avance científico que la obra de Howard Gardner contiene, es decir, la multidimensionalidad de la inteligencia humana ha pasado desapercibida.**

Ello, **de forma intencionada**, o no. Consecuencia de ello, no se han desarrollado sus repercusiones en el ámbito del diagnóstico de las diferentes capacidades y talentos de los estudiantes, por tanto, tampoco en el ámbito de la educación diferenciada.

La investigación científica específica sobre las Altas Capacidades y en particular sobre la Superdotación ha resultado fundamental para el avance de la investigación científica de la inteligencia humana; también a la inversa. En este aspecto es esencial la conferencia del Prof. José de Mirandés en la Universidad de Barcelona, en el año 2001: “La Teoría de Joseph Renzulli en el Fundamento de El Nuevo Paradigma de la Superdotación”, en la que explica la evolución científica desde aquella inicial y rudimentaria tipología meramente psicoeducativa o cognitiva hasta los fundamentales avances por que la investigación de las Neurociencias han permitido alcanzar el nuevo paradigma multidimensional de la inteligencia humana que reconoce los factores neurobiológicos, los factores neuropsicológicos así como los sociales o socio-pedagógicos inherentes.

En particular el Prof. De Mirandés en aquella conferencia en la Universidad de Barcelona explica las aportaciones de Joseph Renzulli mediante su célebre Teoría de los Tres Anillos, que al incorporar la motivación como componente fundamental introduce un factor que superando la antigua visión monolítica de la inteligencia entra en el ámbito clínico no patológico, alcanzando la multidimensionalidad, que ha permitido el posterior descubrimiento de la inteligencia humana como **sistema complejo de funcionamiento.**

<http://altscapacidadescse.org/lateoriajosephrenzulli.htm>

## **2. Los sistemas complejos en la naturaleza.**

El Prof. de Mirandés fue el primero en explicar la inteligencia humana como **sistema complejo de la naturaleza.**

Se recoge en las actuales Definiciones Científicas Altas Capacidades. También en el Diccionario de las Altas Capacidades y de la Educación Inclusiva.

La Guía Científica de las Altas Capacidades, declarada de Interés Científico y Profesional, en los siguientes términos:

*“Howard Gardner, de la Universidad de Harvard, al publicar su célebre Teoría de las Inteligencias Múltiples en su obra Estructuras de la Mente, en 1981, como conclusión a*

sus investigaciones, definió la inteligencia humana como: “**potencial biopsicológico de procesamiento de la información**”, situando la inteligencia, sus capacidades y talentos en el ámbito científico de naturaleza biopsicosocial, y otros neurocientíficos han seguido profundizado en el estudio de este nuevo paradigma, o paradigma emergente como algunos científicos lo han denominado.

De la inteligencia monolítica se alcanzó la multidimensionalidad de la inteligencia humana. En la actualidad considerar la inteligencia humana solo como una mera y obsoleta tipología psicoeducativa es un dañino reduccionismo anticientífico.

La inteligencia humana es un **sistema complejo** en funcionamiento, **constituido por múltiples factores neurobiológicos, neuropsicológicos y socio-pedagógicos, en compleja y constante interrelación combinada de causalidades multifactoriales y circulares, en la que los factores se influyen mutuamente dando lugar a cada situación concreta, en un permanente proceso de transformación ontogenética, de origen y fundamento biogenético y sustrato neurobiológico. Su naturaleza y configuración es de carácter neurobiológico, neuropsicológico, y epigenético.**

En consecuencia, para obtener el conocimiento científico del funcionamiento de la inteligencia humana, de sus capacidades y talentos, y poder deducir sus verdaderas necesidades de desarrollo, es necesario evitar los frecuentes reduccionismos anticientíficos, y conocer, reconocer, y fundamentarse en la multidimensionalidad de la inteligencia humana, y por tanto en su interdisciplinaridad, conforme ha descubierto la investigación científica en Neurociencias y en su funcionamiento como **sistema complejo**. Así, mediante la preceptiva Educación Inclusiva o personalizada las capacidades intelectuales descubiertas se podrán desarrollar y transformar en talentos”



El Prof. De Mirandés observó la existencia en la naturaleza de diferentes sistemas que presentan **fenomenologías convergentes**, que no pueden derivarse únicamente del estudio y la comprensión de las leyes fundamentales específicas que siguen sus componentes elementales.

El estudio de estas **fenomenologías convergentes** ha permitido advertir la existencia conceptos y conductas que tienen **relevancia común en todas las ciencias y ramas del saber.**

En el mundo de la Física hallamos ejemplos sencillos muy significativos como son: el fenómeno de la percolación que se produce al propagarse un líquido a través de una sustancia sólida y porosa, los modelos de pilas de arena, una red cuyos enlaces sean muelles elásticos, los gases reticulares y el gas con arrastre, el modelo de Ising y sus variantes, incluso los sistemas de reacción-difusión, y otros.

Se trata de sistemas con diferentes componentes que interaccionan entre sí mediante el intercambio de **fuerzas o bien de información**. Eventualmente, sufren la acción de agentes externos, como pueden ser los campos eléctricos o magnéticos, la gravedad, los cambios en el medio ambiente, entre otros.

En definitiva, se trata de “*múltiples factores en compleja y constante interrelación combinada de causalidades multifactoriales y circulares, en la que los factores se influyen mutuamente dando lugar a cada situación concreta*”

¿Les suena esta definición? Es, como más arriba hemos visto, la misma definición general de inteligencia humana del Prof. José de Mirandés tal como se halla en la Guía Científica de las Altas Capacidades, desde la perspectiva de su conferencia en la Universidad de Barcelona el año 2001.

Esta identidad conceptual nos permite afirmar que el funcionamiento de la inteligencia humana se rige por los principios comunes de la Física del Mundo. Ello no es de extrañar, pues, por otra parte, las células están formadas por moléculas y estas por átomos sujetos a las leyes comunes de la Física. Y, los átomos están formados por partículas subatómicas que se rigen por la Mecánica Cuántica. Por otra parte, la inteligencia humana, básicamente es el funcionamiento de la mente en su órgano que es el cerebro, cuyas conexiones neurales no son más que sistemas de conexiones eléctricas que se rigen por las leyes de la Mecánica Cuántica.

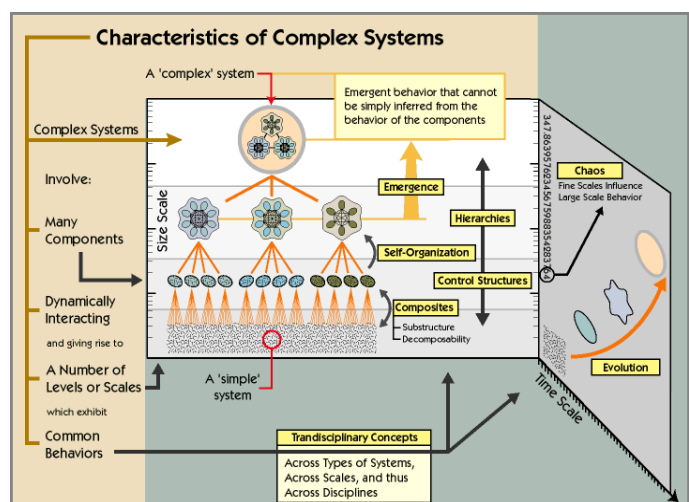
En consecuencia, el estudio de la inteligencia humana y de sus especificidades no culmina con el conocimiento de los factores clínicos inherentes y la incorporación de profesionales con competencias clínicas para su reconocimiento diagnóstico personalizado en cada caso y por parte de los equipos multidisciplinares de profesionales expertos que rigen los centros homologados, pues habrá que ir pensando en la incorporación de Físicos Cuánticos para que diagnostiquen estas conexiones neurales, en su intensidad, frecuencia, onda, cualidad cuántica de las corrientes de electrones en sus interacciones permanentes con los demás factores inherentes.

La fenomenología común que presentan estos sistemas es muy compleja, no en vano estamos hablando de sistemas complejos de funcionamiento en el sentido de que no siguen de modo sencillo el conocimiento de las leyes de interacción entre los componentes.

Por otra parte, sus cambios tienen lugar en las diferentes escalas de tiempo y espacio, lo que permite afirmar que, nunca existe un suceso único, ni tampoco prototípico o característico.

Existen amplios márgenes de imprevisibilidad en el campo de la Física, lo que produce la sensación de existencia de voluntad, incluso de caprichos múltiples.

Sin embargo, también existen algunos rasgos de sencillez entre tanta complejidad; por ejemplo, las propiedades estadísticas siguen a menudo unas leyes potenciales muy simples, con una cierta universalidad, que permite deducir la existencia de, leyes potenciales aparentemente idénticas en sistemas que, desde un punto de vista microscópico, son aparentemente dispares.



Estos sistemas tienen en la naturaleza un alto grado de libertad y la Física Estadística realiza estudios sistemáticos y rigurosos.

La configuración “s” de sus unidades elementales, permite en estos casos definirse la función Hamiltoniano,  $H$ , que determina su energía total,  $E = H(\mathbf{s})$ . Si el sistema está en equilibrio canónico a temperatura  $T$ , se define la “función de partición”, donde la suma es sobre todas las configuraciones posibles que puede adoptar el sistema, y cuyo logaritmo resulta ser la energía libre, esto es, un potencial termodinámico del que se sigue toda la información macroscópica sobre el sistema. Algunos de los sistemas que nos interesan aquí puede caracterizarse como sistemas en equilibrio con un Hamiltoniano bien definido, por lo que no se les puede aplicar este formalismo tan poderoso.

La aparición de fenómenos complejos está relacionada también con la existencia **puntos críticos y puntos de bifurcación** donde tienen lugar cambios estructurales o en las simetrías del sistema, que puedan inducir una fase de inestabilidad o criticidad, donde el sistema presenta, cuando recibe pequeños estímulos desde otras partes del sistema o desde el exterior, una respuesta que es altamente no-lineal. Esto puede ocasionar que se intensifiquen y se propaguen pequeñas perturbaciones sin amortiguamiento a lo largo del sistema o aparición de cierto tipo de orden en el sistema.

### 3. La complejidad y el caos.

Otra de las características asociada a los **sistemas complejos** es la sensibilidad a las condiciones iniciales como ocurre con los sistemas caóticos. De hecho, en el estudio de los sistemas complejos se introducen los sistemas caóticos como **un paradigma de sistema complejo** en el sentido que su comportamiento es complejo, altamente impredecible, manifestando alta sensibilidad a las condiciones iniciales y para el que es necesario la presencia de no-linealidades en la dinámica del sistema.

La complejidad y el caos puede surgir debido al alto número de grados de libertad que presenta el sistema, y a las interacciones que se producen entre ellos, por ejemplo, un fluido, o en sistema relativamente sencillo con pocos grados de libertad, pero con no-linealidades presentes, inducen un comportamiento impredecible.

### 4. Autómatas celulares.

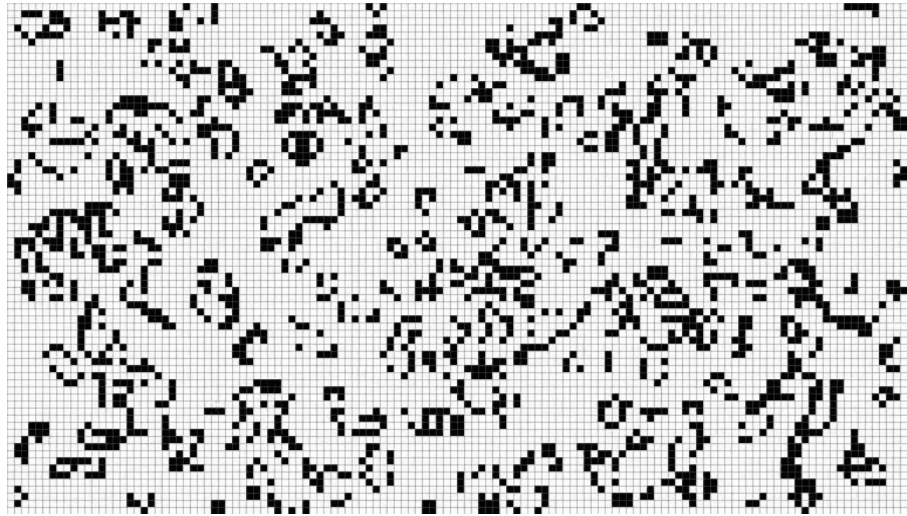
Otro ejemplo de sistemas sencillos que dan lugar a complejidad son los llamados autómatas celulares como “**El Juego de la vida**” de Conway.

Se trata de sistemas reticulares donde los nodos o “células” pueden tener solo un



número finito de posibles estados.

(dos en el caso del juego de la vida, esto es “vivo” o “muerto”) y donde con unas pocas **reglas locales de interacción** entre los nodos puede surgir una fenomenología emergente compleja:



En una red cuadrada regular cada célula interactúa con sus 8 células vecinas.

En cada paso de tiempo pueden ocurrir las siguientes transiciones:

1. Cada célula viva con menos de dos vecinas vivas se muere.
2. Cada célula viva con dos o tres vecinas vivas permanece viva en el siguiente paso temporal.
3. Cada célula viva con más de tres vecinas vivas muere como debido a una superpoblación.
4. Cada célula muerta con exactamente tres vecinas vivas pasa a estar viva (reproducción).

Con estas sencillas reglas aparecen formas cambiantes en el tiempo complejas, algunas que viajan a lo largo del espacio, otras estáticas y otras que cambian de forma periódica, etc.

## 5. Sensibilidad a las condiciones iniciales.

Para medir la sensibilidad a las condiciones iniciales se utiliza el llamado **Exponente de Lyapunov** que indica como se separan las trayectorias de un sistema dinámico a partir de dos condiciones iniciales muy próximas. Si denotamos por  $\delta X_0$  la separación

| |

inicial de dos condiciones iniciales en la evolución del sistema dinámico entonces la tasa de separación exponencial {de dichas} condiciones iniciales en cualquier tiempo posterior en cualquier componente del vector  $X = (X_1, \dots, X_n)$  define los exponentes de Lyapunov, es decir, asumiendo que dicha separación diverge exponencialmente en la forma donde el conjunto  $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  define el espectro de exponentes de Lyapunov.

Dado el factor exponencial en la práctica basta con evaluar el mayor exponente de Lyapunov para determinar si dos trayectorias muy próximas inicialmente se separaran o no, y se define entonces de forma que un valor positivo para  $\Lambda$  implica una divergencia exponencial de la distancia entre las trayectorias a tiempos suficientemente largos para condiciones iniciales que difieren en una cantidad infinitesimal, es decir el sistema es caótico o aperiódico y la dinámica impredecible y compleja.

## 6. La Auto-organización.

El término auto-organización está muy íntimamente relacionado con el término de complejidad.



Se entiende por auto-organización el proceso mediante el cual un sistema natural se reproduce a sí mismo mediante sus propia lógica y los elementos que lo componen.

En los sistemas auto-organizados ellos mismos son su propia causa y razón de ser, es decir, se producen a sí mismos. Aparece en ellos un nuevo orden con nuevos fenómenos que resultan de la interacción entre todos los elementos del sistema.

La auto-organización está muy íntimamente relacionada con la complejidad, y está formada de fenómenos “emergentes” resultado del efecto cooperativo de los elementos que lo constituyen.

- Los sistemas auto-organizados son autocontenidos, todo ocurre dentro del sistema.
- Los sistemas auto-organizados son sistemas complejos: criticidad, no-linealidad, bifurcación hacia la inestabilidad, aparición de orden, retroalimentación de procesos.

- La auto-organización de los sistemas complejos induce una jerarquización de los mismos, en el sentido de que, primero aparecen fenómenos emergentes en un nivel alto que no se encuentran o se pueden explicar al nivel de los constituyentes elementales.

En el caso del cerebro las memorias, la autoasociación, el recuerdo o la propia conciencia son funciones de alto nivel que no se pueden comprender sólo del funcionamiento de las neuronas o de las sinapsis, y mucho menos si nos retrotraemos a nivel molecular y atómico, pues la complejidad es mayor en los niveles más altos que a nivel más elemental, desde un árbol hasta la estructura de una neurona).

## 7. La Criticidad.

Los rasgos que caracterizan a los sistemas complejos son comunes a los sistemas. Cuando se varían ciertos parámetros: temperatura o densidad del sistema, pueden sufrir un cambio de fase y en consecuencia pueden ser sintonizados en un punto crítico.

Aparecen entonces fenómenos relevantes como respuesta no lineal a estímulos que se intensifica y propaga sin amortiguamiento por todo el sistema como si este estuviera correlacionado como en estado crítico, incluso mostrando una divergencia de la longitud de correlación, o la existencia de leyes de potencias para las distribuciones estadísticas de propiedades del sistema, existencia de avalanchas de actividad en el espacio y el tiempo que se distribuyen mediante leyes de potencias. Consecuencia de esto aparece una invariancia de escala, como modelo de Ising en el punto crítico.

La invariancia de escala, si tenemos una ley potencial, se pone de manifiesto de la siguiente forma:

$$f(x) = Ax^{-\eta}$$

Si cambiamos de escala  $x \rightarrow ax$ , obtenemos

$$g(x) = (Aa^{-\eta})x^{-\eta}$$

es decir, para cualquier valor del exponente  $\eta$ ,  $g(x)$  es una función indistinguible de  $f(x)$ , excepto que la amplitud  $A$  ha cambiado en un factor  $a^{-\eta}$ . Dicho de otro modo, el cambio relativo  $f(x) / f(ax) = a^{-\eta}$  es independiente de  $x$ , lo que pone de manifiesto que no existe una escala característica en el fenómeno.

Esta invariancia de escala además implica decaimientos cualitativamente prolongados o

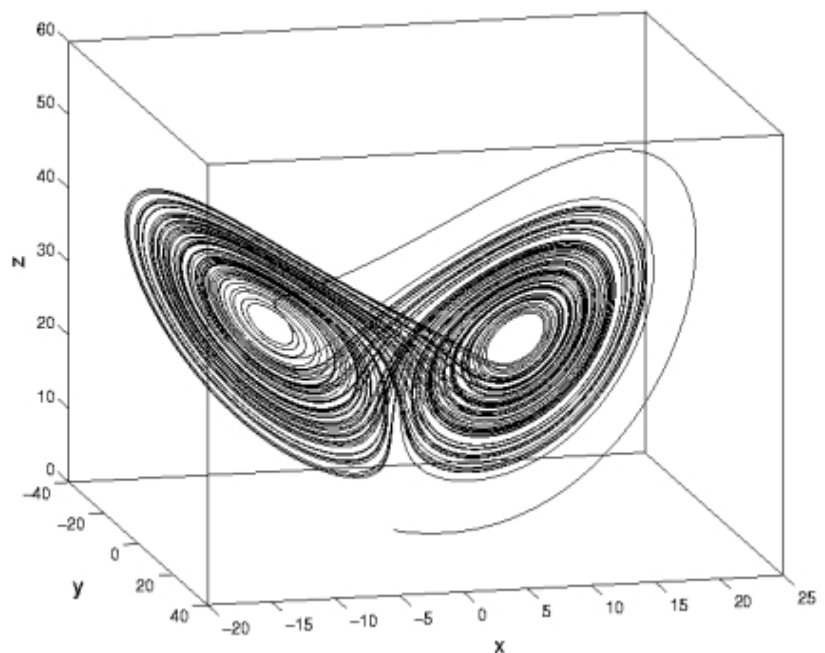
algebraicos. Estas propiedades no se dan si el fenómeno está controlado por funciones exponenciales como  $\exp(-x/\xi)$ .

En este caso, los decaimientos son rápidos, y un cambio de escala  $x \rightarrow ax$  cambia la longitud de correlación  $\xi$  que mide la escala característica para el decaimiento, en un factor  $a$ : no hay invariancia de escala.

En la práctica, las leyes potenciales que caracterizan la criticidad se extienden a lo largo de un rango finito para la distancia, el tiempo, donde  $n(\mathbf{r})$  es un campo que describe espacialmente el estado del sistema.

Por ejemplo, si  $n(\mathbf{r}, t)$  es la densidad local de partículas en un fluido o la magnetización local en un cristal magnético. Se tiene que lejos de la "temperatura crítica", estas correlaciones decaen exponencialmente,  $G(r) \sim \exp(-r/\xi)$  más allá de la longitud de correlación  $\xi$ .

Este parámetro diverge  $\xi \sim (T - T_C)^{-\nu}$  al aproximarse a la temperatura crítica. En el punto crítico,  $T = T_C$ , la función de correlación cambia su comportamiento funcional de exponencial a algebraico,  $G(r) \sim r^{-\eta}$ . En consecuencia, la divergencia de  $\xi$  se considera como señal de ausencia de una escala característica de longitudes en  $T_C$ .



En la práctica, las funciones de distribución suelen ser más apropiadas que la  $G(r)$  para evidenciar invariancia de escala y criticidad.

En algunas situaciones la magnitud de interés fluctúa en el tiempo,  $q(t)$  de forma que es más útil definir la función de correlación temporal, de forma que si tenemos  $S(f) \sim 1/f^\beta$  es un indicativo de criticidad.

Volvamos sobre el concepto de criticidad. Para medir cómo reacciona el sistema a una perturbación externa puede definirse el tiempo de respuesta, o reacción, característico y la longitud de correlación, o escala para las longitudes, a lo largo de la que decae espacialmente la perturbación.

En un estado ordinario, no crítico, aunque la respuesta puede diferir en detalle al cambiar la posición y el instante de la perturbación, la distribución de respuestas es estrecha y queda bien caracterizada por la respuesta promedio (distribución exponencial o Gaussiana).

Por el contrario, la misma perturbación aplicada cambiando la posición y/o el instante origina una respuesta de tamaño impredecible si el sistema es crítico; el promedio puede no existir (como ocurre de hecho en algunas distribuciones tipo ley de potencias) y, en

cualquier caso, no es una medida suficiente de la respuesta.

## 8. La Criticidad autoorganizada.

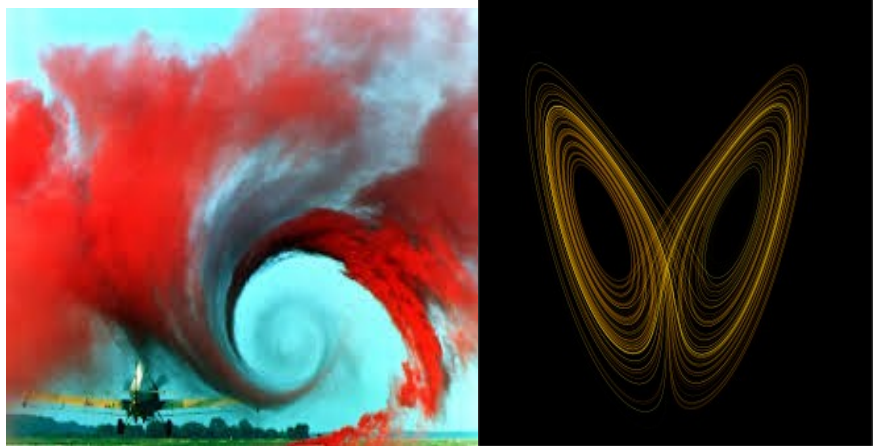
El descubrimiento de la criticidad autoorganizada (SOC) es uno de los logros más importantes de la física estadística en las últimas décadas. SOC agrupa un conjunto muy amplio de fenómenos que se dan en la naturaleza que combina la autoorganización y la criticidad para describir la complejidad observada en estos fenómenos.

Por lo tanto, podría definirse como un mecanismo físico para explicar la complejidad de muchos fenómenos naturales que aparecen no solo en física, sino en también en otras ramas del saber cómo la biología, la química, la sociología y la economía.

El concepto de SOC fue propuesto por primera vez por Bak–Tang–Wiesenfeld (BTW) en un importante artículo publicado en 1987 . (C.; Wiesenfeld, K. (1987). "Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise".

SOC es una propiedad de los sistemas dinámicos por la que organizan su comportamiento microscópico presentando invariancia de escala en el espacio y el tiempo. La fenomenología emergente entonces se parece al comportamiento observado en los puntos críticos en los cambios de fase.

Sin embargo y a diferencia a lo que ocurre en los cambios de fase, los sistemas que presentan SOC no requieren un ajuste externo fino de ningún parámetro de control (como por ejemplo podría ser la temperatura en el cambio de fase de hielo a agua líquida o de esta a gas o la densidad), es decir el sistema de autoorganiza de forma autónoma y dinámica en un comportamiento crítico.



Ejemplos de sistemas que presentan SOC son los modelos de pilas de arena, que presentan avalanchas de arena sin una escala características en el tiempo y el espacio, modelos de terremotos, ciertos modelos de actividad cortical que presentan avalanchas de actividad también invariantes de escala, o las redes evolutivas invariantes de escala (como veremos más adelante) que explican la topología estructural, por ejemplo, de Internet, o de la propia topología estructural y funcional del cerebro humano.

El modelo más sencillo que muestra SOC es el llamado modelo de pila de arena BTW. Consiste en una red cuadrada (en dimensión  $d=2$ ) donde en cada nodo hay definida una pendiente local  $z(x, y)$ . Cualquier punto tal que  $z(x, y) > 4$  es inestable y se

desmorona siguiendo la regla:

$$Z(x, y) \rightarrow z(x, y) - 4$$

$$Z(x \pm 1, y) \rightarrow z(x \pm 1, y) + 1$$

$$Z(x, y \pm 1) \rightarrow z(x, y \pm 1) + 1$$

Hay versiones del modelo que asumen también que en una escala temporal muy grande cada pila se va cargando

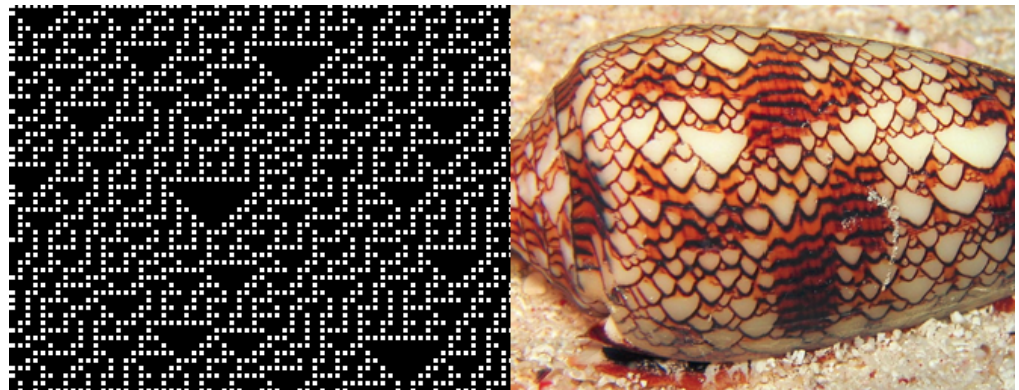
$$Z(x, y) \rightarrow z(x, y) + 1 \text{ (perturbación no conservativa)}$$

## 9. Fractales.

Los modelos de pila de arena son modelos de no-equilibrio que no necesitan ser sintonizados para que las magnitudes de interés muestren correlaciones de largo alcance y criticidad. Fueron propuestos como un mecanismo físico que explicara la aparición de complejidad en la naturaleza, la invariancia de escala y la existencia de los llamados fractales, como los árboles, los copos de nieve, las fracturas sísmicas, etc.

Esta teoría ambicionaba explicar por qué los fractales y las series (fractales) con fluctuaciones  $1/f$  son tan comunes en la naturaleza.

Similitud 1 - D  
entre un autómata  
celular y un patrón  
biológico



De hecho, a pesar de todo lo que hoy sabemos acerca de los fractales, aunque todavía no entendemos bien por qué se forman. ¿Qué aspectos en la evolución o en la dinámica de los sistemas complejos son responsables de la formación de fractales?

Muchos materiales forman estructuras cristalinas, como los metales y la sal común. No es demasiado sorprendente puesto que las fases cristalinas ordenadas se corresponden con la mínima energía posible.

Los fractales no se corresponden con la configuración de mínima energía en equilibrio

termodinámico, luego su formación debe de ser guiada por algún principio dinámico de selección mientras el sistema evoluciona (generalmente hacia un estado estacionario fuera del equilibrio).

Muchas estructuras espaciales naturales se forman por agregación espontánea de gran número de componentes idénticos. Por eficacia, este proceso de agregación sigue ciertas prescripciones sencillas que podemos llamar principios de organización.

Los más sencillos son el principio de regularidad y el principio de aleatoriedad. El primero es responsable, por ejemplo, de las formas periódicas o casi periódicas en cristales, aleaciones, etc.

El segundo es responsable de gases, vidrios, etc. Entre esos dos principios estaría el principio de auto-semejanza responsable de las estructuras llamadas fractales. En éstas, cuando una parte es amplificada usando el mismo aumento en todas las direcciones, se obtiene algo indistinguible del conjunto (invariancia de escala).

Consecuentemente, el objeto tiene el mismo aspecto en (muchas) escalas distintas de observación (al igual que en un punto crítico).

Otra característica esencial de los fractales consiste en que se trata de una variedad matemática con dimensión fraccionaria.

Notemos que, en relación con los sistemas que nos interesan, puede definirse, en primer lugar, su **Dimensión euclídea, la dimensión topológica, y la dimensión Hausdorff**:

1. **Dimensión euclídea**,  $d$ , como la del espacio en que reside; este número es siempre entero,  $d = 1, 2, 3$ , etc.
2. **La dimensión topológica**,  $d_T$ , se corresponde más con nuestra idea intuitiva de dimensión;  $d_T = 1$  para una curva continua,  $d_T = 2$  para una superficie continua, etc. Esta no puede superar la dimensión del espacio que contiene a la variedad matemática en cuestión,  $d_T \leq d$ .
3. **La dimensión Hausdorff**, que toma valores no enteros en variedades fractales, como sigue: Definimos “esferas  $d$ -dimensionales” como generalización del concepto tridimensional, esto es, un segmento de longitud  $2a$  para  $d = 1$ , un disco de radio  $a$  para  $d = 2$ , etc. Sea  $N(a)$  el número mínimo de esferas  $d$ -dimensionales necesarias para cubrir por completo la variedad en cuestión. Entonces, la dimensión Hausdorff,  $D$ , se define:

$$N(a) \sim a^{-D} \text{ para } a \rightarrow 0$$

y se tiene que:  $d_T \leq D \leq d$

El límite superior es claro, pues lo más que puede hacer una variedad

(una curva, por ejemplo), por mucho que se distraiga, es llenar el espacio en el que está definida. También el límite inferior es claro: la variedad ha de tener, al menos, la dimensión de sus elementos.

## 10. A modo de epílogo.

Si has conseguido llegar hasta aquí leyendo seguido y no has entendido, seguramente entenderás lo que dijo Richard Feynman, uno de los físicos más brillantes del siglo XX:

***"Si piensas que entiendes a la mecánica cuántica es que en realidad no entiendes la mecánica cuántica".***

Y, si ya comprendes esto, seguramente es que te encuentras en la mejor posición inicial para comenzar a comprender la Física cuántica, porque en realidad es una teoría científica que revela una realidad verdaderamente extraña que escapa a nuestra intuición y a nuestra lógica, pero que funciona con una lógica matemática, aunque todavía no ha logrado explicarnos: ¿Por qué no podemos predecir los fenómenos cuánticos con exactitud?

El físico francés Serge Haroche, decía: *"La forma en que la naturaleza se comporta en esta*

***¿Tenía razón Einstein cuando decía: "Dios no juega a los dados con el universo?"***

***O tenía más razón el Físico Born cuando le respondió: ¿Quién eres para decir a qué juega Dios?***

***¿Acertaba Einstein cuando dijo: "¡Quiero conocer el pensamiento de Dios, porque todo lo demás es pura anécdota"!?***

