

ACTIVIDAD ELECTROENCEFÁLICA SEGÚN LA TEORÍA DEL CAOS

Cristina Andreu, Jesús de Echave* y Gualberto Buela-Casal**

Ministerio de Educación y Cultura (Zaragoza), * Ayto. de Zaragoza, ** Universidad de Granada

En este artículo se plantea cómo la teoría del caos puede ayudarnos a entender la complejidad de la actividad electroencefalográfica (EEG). Se hace una breve introducción a la teoría del caos y una definición de la terminología propia de esta teoría. A continuación, se revisan los trabajos publicados sobre las posibilidades que la teoría del caos ofrece para entender la gran complejidad de la actividad EEG, tanto en sujetos normales como en pacientes con alguna patología. Además, se analiza la actividad cerebral durante la vigilia y durante el sueño. En las conclusiones, se resalta cómo la teoría del caos permite diferenciar cambios en la actividad EEG ante la presencia de alguna patología y también diferenciar entre la actividad de sueño y vigilia. Se indican algunas sugerencias sobre el significado de la actividad EEG dentro de la dinámica caótica.

Analysis of the electroencephalography activity according to the chaos theory. The purpose of this article is to show how chaos theory can help us to understand complexity of electroencephalographic (EEG) activity. A brief introduction of this theory is made and the definition of its terminology. Then, works published up to date are revised and possibilities that it offers to know about complexity of EEG activity in normal subjects and in patients with some psychopathology. In addition, it analyses the cerebral activity during watchfulness and during sleep. Lastly it is pointed out how chaos theory can distinguish changes in the EEG activity when any pathology is present and between the activity of sleep and watchfulness as well. Some suggestions about the meaning of the EEG activity into chaotic dynamics are proposed also.

Se considera a Lorenz como uno de los pioneros del caos. Este matemático trabajaba en investigación meteorológica en los años sesenta. La capacidad de cálculo de los ordenadores le permitió construir un modelo para reproducir el tiempo atmosférico mediante ecuaciones que expresaban las relaciones entre temperatura, presión, etc. Empleó un or-

denador que representaba gráficamente, mediante curvas, las distintas variables. Un día, por ahorrar tiempo, introdujo en el ordenador los datos de las series del día anterior copiándolos de la impresora; el resultado debería haber sido una copia exacta del anterior, pero vio que, a partir del primer valle de la curva, ésta comenzaba a separarse y rápidamente ambas curvas perdían cualquier similitud. El motivo era que su ordenador trabajaba hasta con millonésimas y Lorenz había redondeado los datos a milésimas. Un pequeño error numérico, un input ligeramente distinto tenía unos efectos sorprendentes en el output.

Correspondencia: Gualberto Buela-Casal
Facultad de Psicología
Universidad de Granada
18071 Granada (Spain)
E-mail: gbuela@platon.ugr.es

Experimentadores posteriores ratificaron estos resultados; una ligera variación en la secuencia de los datos, ocasionaba cambios importantes en el clima de la otra parte del mundo; este efecto ha sido llamado «efecto mariposa». Este efecto no era accidental, sino necesario; de no producirse, los ciclos meteorológicos obtenidos con estos modelos serían iguales, rígidos, sin reproducir la variación climática real. El nombre técnico de este efecto es el de «dependencia sensitiva de las condiciones iniciales».

En 1986 se llevó a cabo el primer congreso importante sobre el caos referido a la medicina y la biología. Huberman, un investigador del caos, se encontró con un debate sobre el modelo del raro movimiento ocular de los pacientes esquizofrénicos. A diferencia de una persona sana, estos pacientes no logran seguir el suave movimiento de un péndulo que oscila lentamente ante sus ojos, sino que éstos saltan de forma desorganizada en pequeños incrementos sin llegar a posarse en el blanco. Huberman, que era físico y no biólogo, preparó un sencillo modelo que explicase este movimiento. Consideró un mínimo número de variables y obtuvo una ecuación que describía un sistema mecánico análogo al estudiado, el de una pelota que gira en un recipiente curvado que se balancea con un movimiento de péndulo, y en este modelo descubrió orden y caos. En algunos regímenes, el ojo seguía el objeto sin dificultad y en otros no; si aumentaba el poder de no linealidad, el sistema acarrea un desorden caótico que no se distinguía del descrito en la literatura científica sobre el movimiento ocular en los esquizofrénicos. El caos sería un punto intermedio entre lo estrictamente determinístico y lo aleatorio. Se refiere a fluctuaciones irregulares, las cuales son descritas por ecuaciones deterministas, diferentes de las fluctuaciones que obedecen a procesos aleatorios. Esta explicación no fue bien aceptada en un principio porque aunque era sencilla

y manejable, estaba muy alejada de las explicaciones usuales y no recurría a explicaciones biológicas, fisiológicas o psiquiátricas.

Podemos considerar el caos como la ciencia de la naturaleza global de los sistemas. Defiende el comportamiento universal de lo complicado. El caos se ha convertido no sólo en teoría, sino en método, en una forma de hacer ciencia. El caos y la inestabilidad no son lo mismo. Un sistema caótico sería estable si un linaje particular de irregularidad persistiera frente a pequeñas perturbaciones, teniendo en consideración la dependencia sensitiva de las condiciones iniciales. Según May (1976), los sistemas no lineales simples no poseen obligatoriamente propiedades dinámicas sencillas.

Para Mandelbrot (1977) los estudios de pautas irregulares en los procesos naturales, y su exploración de las formas infinitamente complejas, tienen una propiedad común: una cualidad de autosemejanza. Fractal significa sobre todo, autosemejanza. La autosemejanza quiere decir simetría dentro de una escala. Implica recurrencia, pauta en el interior de pauta.

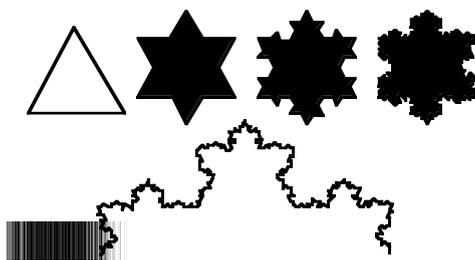


Figura 1. Ejemplo de estructura fractal: copo de nieve de Koch. Comienza con un triángulo de lado 1; en el centro de cada lado se añade otro triángulo que mida un tercio del original y se procede de esta manera con cada uno de los lados de los nuevos triángulos. El límite de la longitud de la línea exterior final será $3 * 4/3 * 4/3 * 4/3 \dots$ infinito. Sin embargo, el área es menor que la de un círculo trazado alrededor del triángulo primitivo. Por lo tanto, una línea infinitamente larga rodea un área finita

Según Feigenbaum (1978), se deben encontrar estructuras escalares: cómo se relacionan los grandes detalles con los pequeños. Las estructuras escalares son lo único que llega a ser en algún sentido, universal. Goldberger, Rigney y West (1990), de la Harvard Medical School, propusieron que la dinámica saludable está marcada por estructuras físicas fractales, como la estructura del sistema nervioso, las ramificaciones de los tubos bronquiales en el pulmón y las fibras rectoras del corazón, que permiten una amplia serie de ritmos. Los ritmos biológicos podrían ser interpretados como la sincronización de la dinámica de estructuras fractales que reproducen un modelo escalar. Las estructuras fractales asociadas con espectros escalares y de banda amplia son ricos en información. Los estados periódicos, en cambio, reflejan espectros de banda estrecha y los definen secuencias monótonas, reiterativas, vacías de contenido informador. Tratar algunos desórdenes biológicos y psiconeurológicos, puede depender de ampliar la reserva espectral de un sistema, de su posibilidad de recorrer muchas frecuencias sin caer en un canal cerrado periódico.

El objetivo de este trabajo es presentar una panorámica de los estudios realizados con la actividad eléctrica cerebral, mediante el registro electroencefalográfico (EEG) en relación a la actividad cognitiva, normal o patológica, empleando métodos propios de la teoría del Caos.

Definiciones

Los modelos de análisis de sistemas dinámicos caóticos han sido aplicados al estudio de la mecánica de fluidos, a la sociología, biología, medicina y más recientemente a la psicología, todos ellos sistemas dinámicos disipativos de energía. La teoría del Caos puede ser definida como el estudio de la conducta aperiódica en sistemas determinísticos no lineales. Un sistema determinístico

no lineal consiste en elementos que tienen influencias no lineales entre sí. El sistema es dinámico si cambia en el tiempo. Si el estado de un sistema dinámico en un cierto momento puede ser descrito por «M» variables, este estado puede ser representado por un punto en un espacio de fase de «M» dimensiones. La evolución en el tiempo consiste en una serie de puntos que forman una trayectoria en el espacio de estados. Cuando el tiempo tiende a infinito, la trayectoria sólo ocupará un subespacio del espacio de estados, denominado atractor. El atractor es la representación geométrica de la dinámica del sistema en el tiempo; los atractores pueden ser caracterizados por sus dimensiones. Un atractor de dimensión 0 corresponde a un sistema estático: el sistema no cambia en el tiempo. Un atractor de dimensión 1 corresponde a un sistema periódico, en el cual un número finito de estados se repiten indefinidamente. Un atractor de dimensión 2 y mayores corresponde a un sistema cuasi-periódico. La dimensión del atractor indica el número de frecuencias independientes. En un sistema estrictamente aleatorio la dimensión es igual a «M». La aportación más importante de la teoría del caos es que existe un tercer tipo de dinámica que es diferente de la aleatoria y de la (cuasi) periódica. Este tercer tipo es denominada dinámica caótica y se caracteriza por la sensibilidad y dependencia de las condiciones iniciales del sistema en su evolución posterior y por la existencia de «atractores extraños».. El caos sería un punto intermedio entre lo estrictamente determinístico y lo aleatorio. Se refiere a fluctuaciones irregulares, las cuales son descritas por ecuaciones deterministas, diferentes de las fluctuaciones que obedecen a fluctuaciones aleatorias.

Las principales características de los sistemas caóticos es que son impredecibles en períodos amplios de tiempo y muy sensibles a las condiciones iniciales del sistema. Una vez iniciado con valores específicos, el fu-

turo sistema podría desarrollarse de forma totalmente diferente si comenzase bajo condiciones ligeramente diferentes al inicio del sistema. La importancia de este hecho para los sistemas biológicos es que desórdenes muy similares podrían estar determinados por muy pocos y simples factores que podrían llegar a ser conocidos.

Una de las medidas cuantitativas clásicas de un sistema dinámico complejo es su *dimensión*, o el número de dimensiones bajo las que puede ser definido un sistema. La dinámica de un sistema complejo puede ser estudiada por el *retrato de fase*, dónde la cantidad de diferentes estados de un sistema determinístico define un atractor. El mecanismo para investigar la conducta de un sistema dinámico es calcular su dimensión de correlación (D2), introducida en la teoría de la información y que es una generalización de la D de Hausdorff (Pritchard y Duke, 1995). La dimensionalidad de un sistema dinámico es una medida del número de variables independientes que se necesitan para especificar su actividad en un momento dado, lo que estima la complejidad y los grados de libertad del sistema estudiado.

Atractor

La propiedad de un sistema dinámico se manifiesta por la tendencia bajo diversas pero delimitadas condiciones a ir hacia un estado de actividad reproducible y permanecer ahí. La trayectoria o atractor es una descripción matemática de la secuencia de valores que toma la variable desde la condición inicial. Las transiciones de un atractor a otro se llaman cambio de estado o bifurcación. Los atractores pueden ser periódicos, cuasiperiódicos y caóticos o atractores extraños.

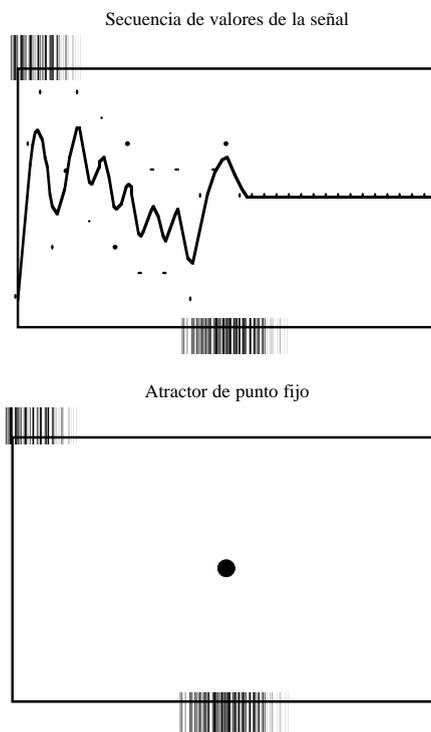
Cada atractor es el comportamiento en el que el sistema se establece al sentir el influjo de un determinado estímulo. La cuenca de un atractor es el conjunto de condiciones

iniciales a partir de las cuales el sistema sigue un determinado comportamiento.

Existen diversos tipos de atractores: de punto fijo, de ciclo limitado, toro y atractores extraños.

Punto fijo

La solución estable más simple; con el tiempo todas las trayectorias terminan en este punto. Los puntos fijos estables son atractores estáticos.

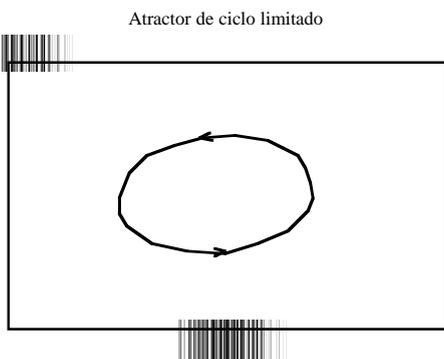
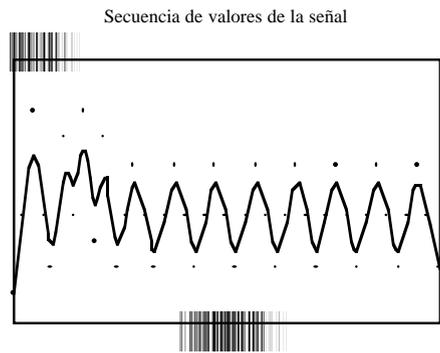


Figuras 2.1 y 2.2. La secuencia de valores de la señal, variable al principio, se convierte en estable e invariable, por lo que su representación es un atractor de punto fijo. La señal converge a un punto

Ciclo limitado

Consiste en una trayectoria recurrente y cerrada en el espacio. Sin una fuerza externa,

el ciclo limitado corresponde a una posición periódica estable del sistema no lineal, cuya amplitud y frecuencia están determinadas por parámetros internos de oscilaciones auto-sostenidas. Actúan como un atractor periódico.



Figuras 3.1 y 3.2. La secuencia de valores alcanza un valor de variación periódica por lo que su atractor es representado por un ciclo limitado estable

Toro

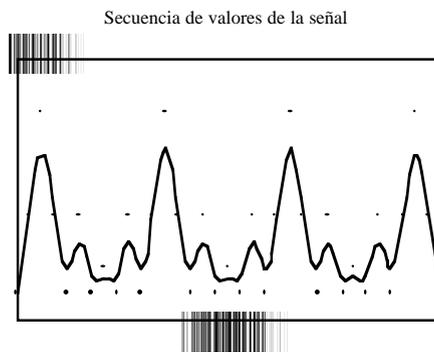
Las trayectorias del sistema se mueven en dos dimensiones toroidales. Están presentes dos frecuencias, oscilaciones alrededor del toro y a lo largo del toro. La trayectoria del toro es un movimiento cuasiperiódico.

Atractor extraño

Los atractores extraños son atractores con una dimensión no integrada, es decir,

fractal. Fractales son estructuras complejas que muestran auto-similitud independientemente de la escala con la que se examinen. Su actividad parece ser aleatoria, pero es determinística y reproducible si el principio y las condiciones iniciales pueden ser replicadas.

El atractor de Lorenz fue el emblema de los primeros estudiosos del caos. Reveló la estructura que escondía una serie desordenada de datos en una secuencia temporal. El atractor muestra las relaciones mutables entre tres variables. En un instante dado, las tres señalan la situación de un punto en un espacio tridimensional; cuando el sistema cambia, el movimiento del punto representa las variables que se modifican continuamente. Como el sistema nunca se repite de



Secuencia de valores de la señal

F(x)



Tiempo

Figuras 4.1 y 4.2. La señal oscila periódicamente en dos bandas de frecuencia por lo que el atractor presenta dos dimensiones, una dentro de la figura toroidal y otra a lo largo del toro. Resulta un atractor estable

modo exacto, la trayectoria jamás se corta a sí misma, sino que describe curvas permanentemente. El movimiento del atractor es abstracto, pero comunica la esencia del movimiento del sistema real.

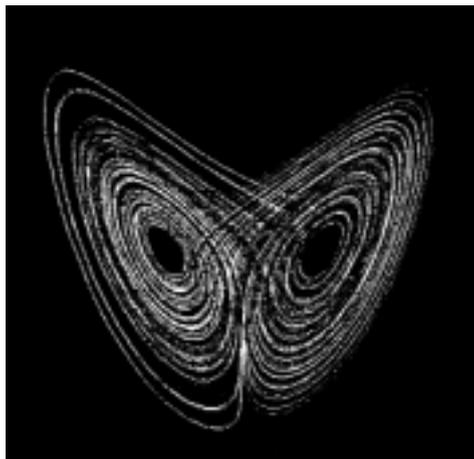


Figura 5. Atractor de Lorenz. Esta imagen reveló la estructura que escondía una serie desordenada de datos. Para evidenciar las relaciones mutables entre tres variables, cada punto representa la situación de las tres variables en un momento dado; por lo tanto, cada movimiento del punto representa un cambio en el valor de una o más de las variables. Como el sistema no se repite nunca de un modo exacto, la trayectoria nunca se corta a sí misma, sino que describe curvas una y otra vez. El movimiento del atractor es abstracto, pero comunica la esencia del movimiento del sistema.

Ruido

En el lenguaje de la dinámica del caos, el ruido sería una señal que muestra un movimiento irregular y que no tiene una dimensión finita, es decir, una señal irregular cuya dimensión de correlación $D2$ no muestra saturación.

Dimensión de correlación ($D2$)

Ha llegado a ser la medida más ampliamente usada para describir conducta caótica. Se define como el mínimo número de dimensiones de un espacio que puede con-

tener las trayectorias generadas por el sistema. La dimensión de un sistema es su número de grados de libertad. Un sistema es periódico si su $D2$ es un número entero (por ejemplo, 3, 2, 8, etc) y caótico si $D2$ es fraccional (por ejemplo, 2,6; 3,5; 1,2; etc).

Los algoritmos para el cálculo de $D2$ están basados en el concepto de representación multidimensional de las señales registradas en una serie temporal en el espacio-fase, el cual hace posible el uso de propiedades geométricas en contraste con un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden en la definición de la base de un sistema dinámico (Niestroj, Spieweg y Herrmann, 1995). Para construir el espacio de fase de una señal continua existen diversos métodos basados fundamentalmente en el cambio de la señal $x(t)$ por pasos (lags) de tiempo $t, 2t, 3t, \dots$. Entonces el espacio de fase es colocado como $x(t), x(t+t), x(t+2t), x(t+3t) \dots$ de manera que cada punto en el espacio de fase representa un estado de la señal. Una secuencia de tales estados a lo largo del tiempo describe una curva denominada trayectoria. Si las trayectorias convergen en el tiempo en un conjunto dimensional bajo, llamado atractor, la señal analizada es determinística; las trayectorias de un proceso estocástico como el ruido, ocupan el espacio de fase completo. Para una revisión técnica de conceptos básicos ver Pritchard et al. (1995).

Retratos de fase

Constituyen la representación gráfica de las trayectorias de una señal. Skarda y Freeman (1985) consideran que el cálculo únicamente del valor numérico de $D2$ es insuficiente para describir el estado del sistema y enfatizan el uso de los retratos de fase multidimensionales para comprender la función cerebral reflejada en la geometría del atractor.

El EEG tiene un atractor extraño: el EEG no es ruido

La actividad del EEG esencialmente resulta de la suma de los potenciales postsinápticos originados inicialmente en el córtex cerebral y que reflejan la actividad eléctrica de aproximadamente un billón de neuronas. Dado el alto número de neuronas y sus infinitos patrones de combinación, es difícil explicar como la actividad EEG puede ser grabada desde el cuero cabelludo. La explicación común es que una amplia población de neuronas están sincronizadas a través de aferencias talámicas y que de este modo su actividad se sobrepone.

Los trabajos pioneros más importantes de Babloyantz, Salazar y Nicolis (1985), Basar (1985), Babloyantz y Destexhe (1986), Rapp, Bashore, Martinerie, Albano y Mees (1989) y Rösche (1992) sobre la presencia de atractores extraños en la actividad eléctrica cerebral interpretan el EEG como conducta caótica.

¿Por qué el caos es importante?. Mpitsoy y Cohan (1986) asumen que el caos puede tener un importante papel en la generación de una adaptación rápida a los cambios ambientales. Las señales que no varíen, como ciclos limitados, no llevarán nueva información al futuro que no sea la que ya contenían. Trabajos sobre la respuesta de potenciales evocados en animales y humanos apoyan esta opinión, mostrando como los potenciales están reducidos o desaparecen si una estructura cerebral muestra actividad de ciclo limitado (por ejemplo, la actividad regular theta del hipocampo durante la cual no se encuentran potenciales evocados de gran amplitud). Mpitsoy et al (1986) también asumen que una evolución a largo plazo del caos es impredecible y que tal impredecibilidad representa una ganancia de información por la cual el cerebro crea nuevas respuestas posibles.

Según Skarda y Freeman (1987) el caos juega diversos papeles cruciales: por un la-

do, el sistema está diseñado y construido para asegurar su propia estabilidad y controlar fuentes de ruido; por otro lado, las señales no son detectadas «dentro» del caos porque el mecanismo sale del caos cuando vuelve a la señal «on line». El mecanismo es extremadamente estable, aunque no absolutamente. La auto-organización dinámica neural hace deseable una reevaluación de los modelos digitales y de analogía del computador en las ciencias cognitivas. Sin la conducta caótica, el sistema neural no podría añadir conocimientos nuevos. El caos provee al sistema con un determinístico estado de «No se» dentro del cual se puede generar un nuevo patrón de actividad; de este modo, genera posibilidades de variabilidad en los sistemas determinísticos. Las transiciones en las ondas cerebrales o bifurcaciones pueden ser consideradas como importantes indicadores acompañando a la patología en la función cerebral y en el procesamiento de la información.

Tanto el EEG como la actividad cognitiva comparten algunas características que las hacen isomórficas: ambas son continuas en el tiempo, evolucionan con la maduración y la edad, responden a estimulación tanto interna como externa y son autoorganizadas. La aplicación de la dinámica caótica a la conducta constituye un prometedor desarrollo teórico, porque implica que los sistemas humanos son abiertos (intercambian energía con el ambiente), no lineales (gobernados por ecuaciones diferenciales no lineales o de diferencia) y autoorganizados. La rápida pérdida de predictibilidad de estos sistemas caóticos no sería debida a su aleatoriedad sino a la extremada sensibilidad a condiciones iniciales del sistema, por la que pequeñas diferencias en el estado de un sistema resultarían en una divergencia exponencial en su conducta futura.

En la psicopatología aparecen valores D2 de actividad epiléptica con valores tan bajos como 2,05, mucho más bajos que en sujetos

sanos. Más aún, diversas formas de crisis epilépticas podrían ser clasificadas de acuerdo a su grado de coherencia, es decir, la correlación estadística registrada en la actividad eléctrica cerebral entre puntos simétricos del cuero cabelludo (Renshaw, 1994). Babloyantz y Destexhe (1986) sugieren que los agentes productores de crisis del tipo «petit mal» tienden a conducir la actividad cerebral hacia un movimiento periódico estable; romper tales estados sería extraordinariamente difícil y sólo posible mediante la dinámica caótica de la actividad cerebral. El EEG de un cerebro sano es irregular; esta actividad experimenta un cambio drástico con el inicio de un acceso epiléptico. Al observar un EEG registrado durante un acceso, se observa que la actividad eléctrica es más violenta en términos de amplitud, pero más regular rítmicamente. Elbert, Lutzenberger, Rockstroh, Berg y Cohen (1992) encuentran un incremento de la actividad EEG en la banda delta en pacientes esquizofrénicos, y también un mayor grado de complejidad (mayores valores de D2) en áreas frontocentrales. La mayoría de los pacientes muestra mayor complejidad dimensional en áreas frontales que en centrales, mostrando una tendencia invertida comparándolos con sujetos sanos controles. Este patrón invertido resultó el hallazgo más significativo, más que las diferencias de D2 en valores absolutos, indicando mayor complejidad en la dinámica cerebral, no necesariamente en las ondas EEG, en áreas frontales de estos pacientes.

Bajos valores de D2 se encuentran asociados generalmente a sueño profundo o psicopatología (coma, epilepsia, demencia); valores intermedios se encuentran en situación de despierto y ojos cerrados y los mayores valores se encuentran asociados a actividad mental. Bajos valores de D2 sugieren un descenso de la complejidad del EEG y un incremento de la sincronización de la dinámica cortical. Tanto en la demencia co-

mo en pacientes con Parkinson se han encontrado un decremento de D2 en el registro del EEG (Stam, Tavy, Jelles, Achtereekte, Slaets y Keunen, 1994). Menores valores de D2 están asociados con el incremento de la potencia relativa en las bandas delta y theta, y menor potencia de la banda beta, aunque la clasificación de los pacientes según el valor de D2 obtenido no pudo discriminar entre los dos grupos de pacientes con la misma precisión que el análisis de la Transformada Rápida de Fourier.

Los datos del valor de D2 en el EEG en distintos autores van de 3 a 8, aunque se aprecia alguna señal de estacionariedad en algunos registros. Hay una amplia fluctuación en la dimensionalidad de las ondas alfa. Esto significa que en este rango de frecuencias el cerebro tiene dos tipos de conducta: ruido y atractores extraños. La existencia de una dimensión D2 convergente en la actividad alfa, sin estimulación física, es evidencia sólida de que el alfa cognitivo, durante el estado de expectancia, no es simple ruido. De hecho el alfa cognitivo ha sido relacionado con el procesamiento de la información durante la ejecución de diversas tareas cognitivas (Corsi-Cabrera, Herrera y Malvido, 1989; Gutiérrez y Corsi Cabrera, 1988; Klimesch, Pfurtscheller, Mohol y Schimke, 1990; Valentino y Dufresne, 1991). El ruido no puede ser generado determinísticamente. La presencia de actividad caótica en un punto dado del registro del cuero cabelludo no garantiza que el caos esté presente simultáneamente en otras áreas del cerebro. De hecho, existe evidencia de que los lóbulos frontales pueden generar ruido durante largos períodos, mientras los occipitales pueden bajo ciertas condiciones mostrar conducta caótica al mismo tiempo. Se ha propuesto que el caos surge en el cerebro cuando dos o más áreas cumplen al menos dos condiciones: se excitan una a otra con suficiente fuerza como para impedir que cualquiera de ellas quede en re-

poso, y, al mismo tiempo, son incapaces de coincidir en una frecuencia común oscilatoria, contribuyendo al aumento de la sensibilidad y la inestabilidad del sistema, al caos.

Freeman (1991) en su estudio fisiológico de la percepción olfativa en ratones concluye que el cerebro busca información, dirigiendo al sujeto hacia la búsqueda de información, resultado de la actividad autoorganizadora que se desarrolla en el sistema límbico; éste libera un mensaje de reafirmación, alertando a los sistemas sensoriales para que se preparen para responder a nueva información. Las redes neuronales responderían en ráfagas. La actividad sincrónica de cada sistema se retransmite a continuación hasta el sistema límbico, donde se combina con la salida producida de manera similar por los otros sistemas, formando una «Gelstat». Inmediatamente, se demanda otra búsqueda de información y los sistemas sensoriales se preparan de nuevo por reafirmación. Cada atractor sería el comportamiento en el que el sistema se establece al sentir el influjo de un determinado estímulo. El acto de la percepción consistiría en un explosivo salto del sistema dinámico desde la «cuenca» de un atractor caótico hasta la de otro; la cuenca de un atractor es el conjunto de condiciones iniciales a partir de las cuales el sistema sigue un determinado comportamiento. La cuenca estaría definida por las neuronas receptoras que se activaron durante el aprendizaje o exposición previa al estímulo para formar asociaciones de células nerviosas. La función integrativa del sistema nervioso central sería una buena aproximación al concepto de atractor.

Lutzenberger, Elbert, Birbaumer, Ray y Schupp (1992) encuentran un incremento de la actividad alfa en tareas que requieren atención a un procesamiento interno y decremento del alfa en tareas que requieren atender a estímulos externos, y mayores valores de dimensionalidad en tareas cognitivas que durante el reposo, lo que interpretan

que está relacionado con los cambios metabólicos locales y potenciales evocados lentos del cerebro. Concluyen que los cambios en la D2 del EEG están más correlacionados con cambios locales en el metabolismo cerebral y con potenciales lentos del cerebro que las medidas de la potencia del EEG. Lutzenberger, Birbaumer, Flor, Rockstroch y Elbert (1992) encontraron que los sujetos con mayores valores de coeficiente de inteligencia presentaban también mayores valores de D2, tanto en situación de reposo como durante la presentación de estímulos de tipo emocional. Durante la situación de reposo, las personas con nivel de inteligencia menor presentaban una relativa reducción en la variabilidad de la actividad cortical, con menos alteraciones en la actividad de grupos neuronales y menores valores de complejidad de la actividad EEG. En contraste, los sujetos con valores altos de coeficiente intelectual presentaban mayores valores de D2, en particular en áreas parietales. Cuando la situación experimental requería una respuesta motora, esta diferencia incluía también las áreas frontales.

Mandell, el psiquiatra que defendió a Huberman en el caso del movimiento ocular de los esquizofrénicos, planteó unos interrogantes: ¿Será posible que la patología matemática, esto es, el caos, sea salud? ¿Y la salud matemática, que es la predecibilidad y lo diferenciado en este género de estructuras, sea equivalente a enfermedad en el terreno biológico? El significado del EEG en niños con patología o disfunción neurológica tiene un significado madurativo, puesto que se conoce cómo la actividad eléctrica se modifica evolutivamente en toda la corteza a lo largo de las distintas edades. Sin embargo, con frecuencia se encuentran niños cuyo nivel de desarrollo y funcionamiento intelectual es propio de la deficiencia mental media o severa y, sin embargo, el EEG ha adquirido un patrón de normalidad. ¿Cuál es el significado de esta desincroniza-

ción? Entendemos que, bajo la perspectiva del funcionamiento de los sistemas dinámicos, la actividad EEG en estos casos habría alcanzado la estabilidad, por lo que las posibilidades de «cambio» o «bifurcación» habrían disminuido, ensombreciendo el pronóstico desde el punto de vista de la evolución cognitiva. Conocemos que la dinámica EEG en patologías como la esquizofrenia o la epilepsia generan atractores cerrados, de bajo valor de dimensionalidad, que resultan muy estables. La posibilidad de introducir bifurcaciones en estos sistemas podría mejorar el pronóstico.

Pritchard y Duke (1995) concluyen que la concepción del cerebro como un sistema dinámico no lineal promete explicar el funcionamiento cognitivo de manera más adecuada que los modelos tradicionales de Inteligencia Artificial (AI), que enfatizan un procesamiento altamente controlado, serial y de arriba-abajo. Una diferencia fundamental entre estas dos concepciones es que la dinámica de sistemas permite el procesamiento aplicando reglas evolutivas a variables numéricas, en lugar de aplicar reglas inferenciales a variables lógicas. Mientras en los modelos clásicos de AI existe un control central que establece qué está permitido operar en un momento en particular, en la dinámica de sistemas la orden extendida deriva de interacciones directas entre las neuronas. Más aún, mientras en un sistema de AI cada regla tiene un significado preciso, es ampliamente común en los sistemas dinámicos que diversos grupos neuronales no tengan un significado o funciones precisas, sino que se especialicen durante la fase de aprendizaje de manera inesperada y difícilmente comprensible para la red de trabajo diseñada (Serra y Zanarini, 1990). Según estos autores, la gran ventaja de los sistemas caóticos determinísticos es que permiten cambiar la actividad casi instantáneamente a través de bifurcaciones (súbitas transiciones desde

una actividad de ciclo limitado a una actividad caótica observadas en muchos sistemas cuando el valor de un parámetro es ligeramente alterado).

Dimensión de correlación en el sueño

Los estudios iniciales de Babloyntz y Salazar (1985) usando caos determinístico encontraron mayores dimensiones en las condiciones de EEG de vigilia que en el EEG de sueño y epilepsia. Bajas dimensionalidades se han encontrado en general entre EEG de reposo y ojos cerrados y mayores en situaciones de actividad cognitiva. Los autores encuentran que el retrato de fase del EEG de vigilia señala en todas las direcciones posibles; en la etapa II de sueño no-REM (NREM) se observa una tendencia hacia una dirección que se acusa todavía más en las fases III y IV, en las que las trayectorias del retrato de fase muestran un patrón de relaciones reproducibles entre valores instantáneos de las variables pertinentes. Este retrato de fase es el más amplio y muestra un máximo de coherencia que disminuye de nuevo a la entrada en sueño REM. El hecho de que el atractor en el reposo sea fractal y disminuya con la profundidad del sueño implica que la dinámica del sueño profundo llega a ser más coherente durante estas etapas.

Röschke (1992), estudia una muestra de sujetos sanos y esquizofrénicos y concluye que el EEG tiene propiedades de señal determinística en el sueño, con una mayor sincronización del EEG y menores valores de dimensionalidad en el sueño lento, y menor sincronización y mayores valores de dimensionalidad en el sueño no lento, lo que caracterizaría el modelo auto-organizado del sueño. El autor sugiere una alteración de la carga de trabajo del SNC durante el sueño con ensueños (REM) en la psicosis, la cual podría afectar la labilidad del cerebro para el procesamiento de la información, que po-

dría ser expresión de la patofisiología de la esquizofrenia. Asumiendo que el EEG refleja la habilidad del SNC para procesar información, la D2 estimaría el grado de procesamiento durante las diferentes etapas de sueño. El hecho de que el atractor encontrado sea fractal cuya dimensionalidad decrece con la profundidad del sueño, implica que la dinámica llega a ser más coherente durante el sueño profundo. Los pacientes esquizofrénicos presentaron durante el EEG de sueño valores más bajos de D2 durante las etapas II y REM, en las que se supone mayor procesamiento.

Niestroj, Spieweg y Herrmann (1995), en una muestra de 16 voluntarios sanos estudian el sueño del primer ciclo, esto es, hasta la finalización de la primera fase de sueño REM, encontrando mayores valores de D2 durante el sueño REM que durante la fase II de sueño lento, interpretándolo en el sentido de mayor procesamiento de la información durante el sueño REM. Encuentran también dos «modelos» de durmientes diferentes en cuanto a la evolución de sus valores de D2 en las diferentes fases del sueño: una parte de los sujetos presentaron un decremento lineal en sus valores de D2 desde la etapa I de sueño a la fase IV de sueño NREM; el otro subgrupo de sujetos no mostró un decremento estrictamente monótono a lo largo de la profundización en el sueño NREM.

Conclusión

El funcionamiento caótico ha sido encontrado en sistemas biológicos humanos como el sistema respiratorio, la actividad cardíaca, la actividad eléctrica cerebral y variaciones hormonales. Esta dinámica caótica parece sustentarse en estructuras biológicas de carácter fractal, autosimilares, tales como las redes neurológicas, las ramificaciones bronquiales y redes del sistema circulatorio sanguíneo. Esta mayor redundan-

cia de la información, mediante la autosimilitud de las estructuras biológicas subyacentes, parece operar aumentando el índice de seguridad en la transmisión de las señales. A su vez, los sistemas dinámicos aportan mayor flexibilidad en la respuesta de los diferentes sistemas, favoreciendo la adaptación de éstos a las cambiantes demandas del ambiente, gracias a su especial sensibilidad ante pequeñas modificaciones en las condiciones iniciales. Esta mayor flexibilidad explicaría la variabilidad de las respuestas encontradas en los sistemas y la imposibilidad de su predicción exacta, no por la aleatoriedad de los sistemas, sino por su dinámica caótica.

Los trabajos de Skarda y Freeman (1987), Freeman (1991), Lutzenberger et al. (1992), Nan y Jinghua (1988), Serra y Zannarini (1990) y Pritchard (1995) indican actividad caótica en la actividad eléctrica cerebral, contingente a la actividad cognitiva. A su vez, esta actividad eléctrica resulta más compleja, determinada por un mayor número de dimensiones, a medida que la tarea a realizar es más compleja, o bien el sujeto tiene mejor ejecución. Estos resultados son congruentes con los estudios de EEG y sueño, dónde se encuentra menor complejidad dimensional y mayor ritmicidad durante la actividad eléctrica cerebral del sueño lento que en el sueño REM, de acuerdo también con el grado de procesamiento de información que se da en estas fases. En Psicopatología, los trabajos (Babloyantz y Destexhe, 1986; Renshaw, 1994; Elbert et al., 1992; Stam et al., 1994) encuentran también actividad caótica de baja dimensión y alta sincronía o ritmicidad en patologías como demencia, esquizofrenia y epilepsia, en contraste con sujetos sanos que presentan una actividad EEG de mayor dimensionalidad y mayor variabilidad de la señal (menor ritmicidad).

Puesto que la actividad eléctrica cerebral comparte importantes características con la

actividad cognitiva (secuencialidad, continuidad, evolución, sensibilidad a señales internas y externas y autoorganización) resulta posible que también la propia actividad cognitiva esté expuesta a la dinámica caótica no aleatoria.

Agradecimientos

Este artículo fue realizado durante una estancia en la Universidad de California, financiado con cargo al programa de movilidad de profesorado M.E.C.

Referencias

- Babloyantz, A y Destexhe, A. (1986). Low dimensional chaos in an instance of epilepsy. *National Academy of Science USA*, 83, 3513-3517.
- Babloyantz, A., Salazar, JM. Nicolis, C. (1985). Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sleep cycle. *Physics Letters*, 111A (3), 152-156.
- Basar, E. (1990). Chaotic dynamics and resonance phenomena in brain function: progress, perspectives and thoughts. En E. Basar (comp.). *Chaos in brain function* (pp.1-30). Nueva York: Springer-Verlag.
- Corsi-Cabrera, M., Herrera, P., Malvido, M. (1989). Correlation between EEG and cognitive abilities: sex differences. *International Journal of Neuroscience*, 45 (1-2), 133-141.
- Elbert, T., Lutzenberger, W., Rockstroh, B., Berg, P. Cohen, P. (1992). Physical Aspects of the EEG in schizophrenics. *Biological Psychiatry*, 32, 595-606.
- Feigenbaum, M. (1978). Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. *Journal of Statistical Physics*, 19, 25-32.
- Freeman, WJ. (1975). Mass action in the nervous system: examination of the neurophysiological basis of adaptive behavior through the EEG. Nueva York: Academic Press.
- Freeman, WJ. (1991). The physiology of perception. *Scientific American*, 264 (2), 78-85.
- Gleick, J. (1994). *Caos. La creación de una ciencia*. Barcelona: Seix Barral (Orig. 1988).
- Goldberger, AL., Rigney, DR., West, BJ. (1990). Caos y fisiología humana. En *Orden y Caos* (pp. 109-116). Barcelona: Libros de Investigación y Ciencia. .
- Gutiérrez, S. y Corsi-Cabrera, M. (1988). EEG activity during performance of cognitive tasks demanding verbal and/or spatial processing. *International Journal of Neuroscience*, 42 (1-2), 149-155.
- Klimesch, W., Pfurtscheller, G., Mohl, W., Schimke, H. (1990). Event related desynchronization, ERD-mapping and hemispheric differences for words and numbers. *International Journal of Psychophysiology*, 8 (3), 297-308.
- Lutzenberger, W., Birbaumer, N., Flor, H., Rockstroh, B., Elbert, T. (1992). Dimensional analysis of the human EEG and intelligence. *Neuroscience Letters*, 143, 10-14.
- Lutzenberger, W., Elbert, T., Birbaumer, N., Ray, WJ., Schupp, H. (1992). The scalp distribution of the fractal dimension of the EEG and its variation with mental tasks. *Brain Topography*, 5 (1), 27-34.
- May, R.M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459-476.
- Mpitsos, GJ. y Cohan, CS. (1986). Convergence in a distributed nervous system: Parallel processing and self-organization. *Journal of Neurobiology*, 17, 517-545.
- Molnár, M., Skinner, JE., Csépe, V., Winkler, I., Karmos, G. (1995). Correlation dimension changes accompanying the occurrence of the mismatch negativity and the P3 event-related potential component. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 95, 118-126.
- Niestroj, E., Spieweg, I, Herrmann, WM. (1995). On the Dimensionality of Sleep-EEG Data. *Pharmacoelectroencephalography*, 31, 166-172.
- Mandelbrot, B. (1977). *Fractals*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Pritchard, WS. y Duke, DW. (1995). Measuring «Chaos» in the Brain: A Tutorial Review of EEG Dimension Estimation. *Brain and Cognition*, 27, 353-397.

- Rapp, PE., Bashore, TR., Martinerie, JM, Albano, AM., Mees, AI. (1989). Dynamics of brain electrical activity. *Brain Topography*, 2, 99-118.
- Renshaw, E. (1994). Chaos in biometry. *Journal of Mathematics Applied in Medicine and Biology*, 11, 17-44.
- Röschke, J. (1992). Strange attractors, chaotic behavior and informational aspects of sleep EEG data. *Pharmacoelectroencephalography*, 25, 172-176.
- Serra, R. y Zanarini, G. (1990). *Complex systems and cognitive processes*. New York: Springer-Verlag.
- Skarda, A. y Freeman, WJ. (1987). How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behavioral and Brain Sciences*, 10 (2), 161-195.
- Skinner, JE., Molnár, M., Vybirar, T., Mitra, M. (1992). Application of chaos theory to biology and medicine. *Integrative Physiology and Behavioral Science*, 27, 39-53.
- Stam, KJ., Tavy, DL., Jelles B., Achtereekte, H., Slaets, J., Keunen, R. (1994). Non-Linear Dynamical Analysis of Multichannel EEG: Clinical Applications in Dementia and Parkinson's Disease. *Brain Topography*, 7 (2), 141-150.
- Valentino, DA. y Dufresne, RL. (1991). Attention tasks and EEG power spectra. *International Journal of Psychophysiology*, 11 (3), 299-301.
- Wegner, T. y Tyler, B. (1995). *El mundo de los fractales*. Madrid: Anaya Multimedia.
- Ziller, M., Frick, K., Herrmann, WM., Spieweg, I., Winterer, G. (1995). Bivariate global frequency analysis versus chaos theory. *Pharmacoelectroencephalography*, 32, 45-51.

Accepted el 18 de diciembre de 1997

