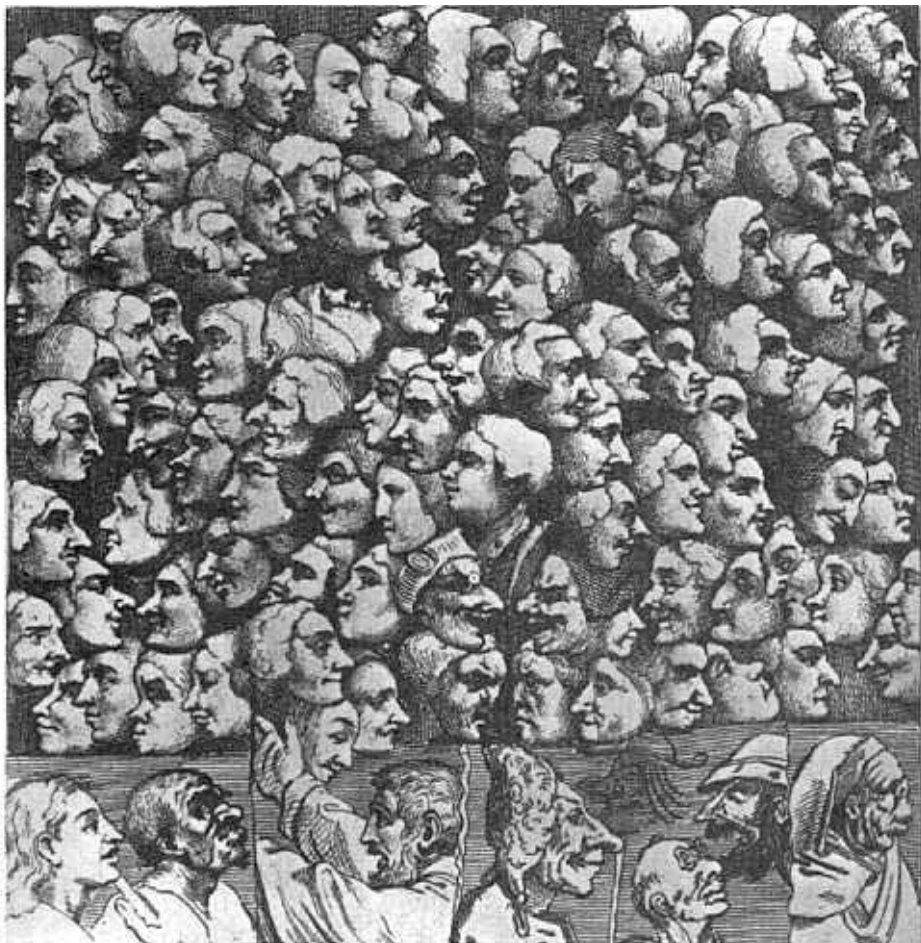


El caos, un intento por dar sentido a la realidad



HORTENSIA GONZÁLEZ Y HUMBERTO ARCE

A la memoria de Carlos, eterno sembrador

Vivimos en un universo en perpetua transformación, nuestros sentidos son bombardeados continuamente por las modificaciones que ocurren a nuestro alrededor. De hecho, la mayoría de nosotros somos observadores y, consciente o inconscientemente, estudiosos de estas transformaciones, pues del conoci-

miento del ritmo y la magnitud de ellas depende muchas veces nuestra vida. Seguramente, entre las primeras series de cambios que fueron estudiadas metódicamente están las distintas posiciones que en el espacio tridimensional ocupa un móvil al desplazarse. Es posible que en no pocas ocasiones este móvil fuera

una piedra que se deseaba tuviera como punto final de su trayectoria la cabeza de alguno de nuestros congéneres. Dicha investigación se ha desarrollado hasta extremos tan sofisticados como son el diseño y la construcción de proyectiles intercontinentales.

Existen también otras trayectorias, de naturaleza pacífica —que están inmersas en otro tipo de “espacios”—, y de las cuales es muy importante conocer su punto final, como la evolución que sigue en el tiempo la temperatura del paciente de alguna enfermedad infecciosa. Así, en el caso de una faringitis, la trayectoria al cabo de algunos días se verá “atraída” hacia un valor fijo, alrededor de los 36°C; pero en el caso de un enfermo de paludismo, la trayectoria puede permanecer oscilando largo tiempo. Existen otras trayectorias de gran belleza, como aquellas que, en ciertas épocas del año, se aprecian en el sur de México, cuando las noches tropicales son surcadas por líneas color verde esmeralda que forman al volar unos insectos conocidos en Tabasco como cucayos, mientras que otros, llamados timbiches, emiten en su camino pulsaciones luminosas, como si quisieran indicarnos los datos de su movimiento con una serie de tiempo (conjunto de medidas realizadas a intervalos regulares). Al estudiar los sistemas biológicos, físicos, económicos, atmosféricos, etc., podemos construir un sinnúmero de trayectorias. La mayoría de las veces nos interesa inferir cuál será su destino: ¿terminarán en un punto o su destino final será recorrer indefinidamente la misma sucesión de puntos?, ¿puede ocurrir que terminen de manera más complicada?, ¿existe alguna información en la estructura final de la trayectoria que nos indique cuáles son los factores o variables que determinan el fenómeno?

Trayectorias y atractores

Cuando las trayectorias terminan en un punto decimos que la dinámica en cues-

ción tiene un atractor puntual, éste es el caso de una canica que dejamos caer desde algún lugar de la superficie interna de un tazón: invariablemente terminará sus oscilaciones permaneciendo inmóvil en el fondo del tazón, sin importar en qué punto de éste fue soltada. Así, el punto más bajo del recipiente es el atractor de la trayectoria, y todos los puntos de la superficie interna forman la cuenca de atracción. En el caso de los fenómenos biológicos, existen ciertas condiciones que conducen a la extinción de determinadas poblaciones de animales, en este caso, el atractor sería el valor cero de la población, y el conjunto de valores iniciales de la población a partir de los cuales ocurre la extinción constituirían la cuenca de atracción. Existen sistemas que siempre recorren la misma sucesión de puntos, por ejemplo, se espera que un satélite artificial gire indefinidamente alrededor del planeta; en este caso se dice que el atractor de la trayectoria es un ciclo límite. Existen poblaciones, osciladores, péndulos y muchos otros sistemas cuyo comportamiento tiene algún tipo de ciclo límite.

Sin embargo, existen comportamientos asintóticos más complicados que son recogidos por un atractor extraño. Un símil un tanto burdo de la estructura de este tipo de atractor es la trayectoria de una mariposa nocturna que, atraída por la luz del foco que alumbra una habitación, vuela desde cualquier punto de ésta y da vueltas alrededor de la bombilla, de una manera que se antoja impredecible. De hecho, bastaría con imponer ciertas condiciones a esta trayectoria para que ésta describiera con más precisión la noción de atractor extraño o caótico pero, ya que estas condiciones son un tanto artificiales, tendremos que abusar un poco de la condición natural de nuestro nocturno lepidóptero para dar una mejor idea de lo que es un atractor caótico. En primer término, la trayectoria debe estar "matemáticamente" determinada, esto es, que será posible establecer rela-

ciones causales entre algún conjunto de variables que determinan perfectamente el fenómeno, lo cual significa que si la mariposa es soltada desde exactamente el mismo punto, deberá seguir la misma trayectoria. Por otra parte, las trayectorias deben ser extremadamente sensibles a las condiciones iniciales, esto es, si al soltar la mariposa (convertida ahora en una especie de juguete mecánico caótico) nos equivocamos ligeramente, "pelesimalmente", en la posición inicial, la trayectoria no solamente será distinta, sino que cada vez diferirá más de la trayectoria anterior. Además de las dos exigencias anteriores, las trayectorias deberán estar acotadas (la mariposa no debe terminar fuera de la habitación) y ser aperiódicas, esto es, no debe repetirse el mismo punto ya visitado en la trayectoria por más que se acerque a él.

Este tipo de comportamiento es estudiado por las llamadas neurociencias. En este campo existen investigadores que, con auténtica temeridad, intentan comprender el comportamiento de sistemas polineuronales que interaccionan entre sí fuertemente sin conocer el número de variables independientes que gobiernan el proceso, mismo en el que no es posible tomar las medidas de las variables de manera continua, sino a intervalos regulares en el tiempo. Si se obtienen registros como los que reproducimos en la figura 1, ¿existe alguna posibilidad de extraer información medianamente comprensible de esta serie temporal? Algunos resultados de la dinámica no lineal nos dicen que, bajo ciertas condiciones, dicha hazaña es posible. En pri-

mer término, esta teoría nos da herramientas para distinguir si el proceso que estamos estudiando es azaroso o está gobernado por una dinámica determinista, lo cual puede averiguarse con una evaluación relativamente sencilla del coeficiente de correlación. Después, bajo ciertas condiciones de nuestra serie de tiempo (condiciones que, hay que decirlo, se encuentran a discusión por los teóricos de la materia) podemos conocer el número de variables de estado involucradas en el fenómeno. También es posible tener alguna idea de los parámetros importantes y de las variaciones cualitativas que éstos pueden producir al estudiar los cambios que ocurren en series de tiempo extraídas bajo distintas condiciones experimentales.¹⁴

Dinámicas no lineales en el sistema nervioso

El sistema nervioso coordina y controla todas nuestras conductas, desde nuestras respuestas más simples hasta las emociones más complejas, como la creación de conocimiento, la literatura, la danza y demás manifestaciones artísticas. Es el sistema que va durante el desarrollo prenatal de un animal posee información indispensable para su supervivencia, pero que a la vez debe modificarse cada día y aprender, que nunca permanece igual, pues su objetivo primordial es propiciar que el organismo crezca, se desarrolle, se reproduzca y junto a los de su especie siga cambiando, siga existiendo.

Una de las aportaciones de la dinámica de sistemas no lineales, especial-

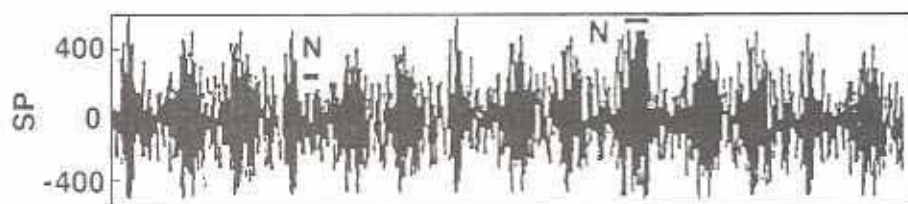


Figura 1. Potenciales eléctricos registrados de la superficie del bulbo olfatorio de conejos despiertos. La actividad en ráfagas está asociada a la inspiración. Modificada de Elbert et al., 1994.

mente de las Teorías de Autoorganización y Caos, ha sido cambiar la manera en la que son expresados los conceptos básicos de la fisiología, como los cambios cualitativos, fluctuaciones, estabilidad y otros conceptos importantes, que con este enfoque matemático encuentran una forma de expresión natural: "...la forma final de los órganos puede verse como un atractor de la dinámica de su desarrollo embrionario, y la manera en la que funciona un animal equivale al funcionamiento global de su metabolismo. Cada una de las formas en las que los sistemas de un organismo oscila tiene varias patologías asociadas en las que el patrón de oscilación se vuelve irregular: en el corazón, la fibrilación; en el ritmo respiratorio, las apneas; en el sistema endócrino, las disritmias; en el cerebro, distintas formas epilépticas o de disquinesias".³ Pero no sólo los estados patológicos pueden pensarse en términos de dinámicas no lineales. Cada vez son más frecuentes los resultados positivos de la aplicación de esta teoría en la fisiología normal, como en los patrones de liberación pulsátil de hormonas o en los patrones de actividad cardíaca, que se vuelven menos "caóticos" por envejecimiento o enfermedad; o bien en las funciones cognitivas, como veremos en seguida. Hoy día es posible aprovechar el desarrollo de la teoría de dinámicas no lineales para abordar el estudio en detalle de estos sistemas, pues se trata ante todo de una perspectiva por medio de la cual se busca describir y comprender la complejidad de la naturaleza. Es posible diferenciar las dinámicas caóticas aleatorias, al menos superficialmente, si nos imaginamos un aeropuerto en época de vacaciones. Para un observador externo es un ajetreo incomprensible, que parece gobernado por el azar. Sin embargo, cada pasajero tiene un itinerario que debe cumplir con rigurosa precisión, pues de otra manera corre el riesgo de quedarse en tierra. Otro sería el caso, si de pronto en ese aeropuerto se avisara que hay una bomba, nadie seguiría orden alguno para transitar y desalojarlo.

Hasta no hace mucho tiempo la mayoría de los investigadores en neurociencias, si no todos, pensaban que las bases fisiológicas del comportamiento se encontraban y agotaban en las células individuales. Esta visión, conocida como la teoría unitaria del funcionamiento del cerebro, supone que el comportamiento puede explicarse según la actividad de las células individuales, la cual es iniciada por algún estímulo. El registro de ráfagas de potenciales de acción asociadas a ciertos estímulos específicos condujo a la descripción de "células detectoras", como las neuronas sensoriales de la visión, que detectan movimiento o color. La descripción de su organización espacial ha mostrado que, en general, poseen disposiciones geométricas características, y como consecuencia de estos hallazgos los fisiólogos han buscado determinar los patrones de conexión y activación sucesiva entre distintos grupos neuronales, relacionados con determinada conducta.

En un extremo de este enfoque se encuentran los investigadores que postulan que las bases de procesos tan complejos como el aprendizaje ocurren a nivel subcelular, por ejemplo, en las sinapsis o en las espinas dendríticas, incluso en cambios en las biomoléculas informacionales (ARN).^{5,6} Existen también quienes consideran que el sistema nervioso acumula información que refleja detalladamente la realidad circundante; otros proponen la existencia de centros de control localizados estructuralmente, una especie de centros de comandos donde se definirían las distintas actividades a realizar. Sin embargo, los seguidores de este tipo de enfoque tendrían que aumentar la capacidad de sus modelos hasta un extremo que se antoja imposible para poder incorporar la extraordinaria variedad y cantidad de estímulos que a todos los seres vivos nos ofrece el medio ambiente.

Si cerramos los ojos por un momento y nos concentramos en lo que llega a

nuestros oídos, podemos percibir una gran cantidad de sonidos. Por ejemplo, al escribir este texto, nosotros escuchamos el zumbido de la computadora, las risas de los niños que juegan en el patio, el llamado de las campanas de la iglesia próxima, y el murmullo de las hojas de un limonero que crece junto a nuestra ventana y que es agitado por el viento. Ambos identificamos cada uno de los sonidos por igual, a pesar de que la primera vez que los escuchamos fue en condiciones muy diferentes: las campanas sonaron por vez primera para la autora en una populosa colonia del México de los sesenta, acompañados del chirriar del tranvía; para el autor, fue en un pequeño pueblo chiapaneco acompañado del monótono zumbido de las cigarras. Ninguno de los dos fuimos introducidos en una cámara insonorizada para seleccionar el sonido de la campana en el instante en que lo aprendimos: pusimos atención en ese sonido y lo distinguimos de los demás, al igual que lo hacemos en este momento. Nos parece que es imposible tener almacenados en el cerebro todos los posibles sonidos de "campana", junto con todos sus posibles acompañamientos y, sin embargo, una vez que algún rasgo del tañido llega a nuestros oídos lo identificamos claramente. Igual ocurre con la fragancia del limonero, pues con los cambios que le impone la turbulencia del viento llega siempre distinta hasta nosotros, estimulando de manera diferente nuestros receptores olfatorios, a pesar de lo cual terminamos por identificarla, aun con los 100 o 200 imbecas en los que ahora permanece sumergida.

Los atractores de la percepción olfatoria

La siempre cambiante realidad que es percibida por nuestros sentidos ha llevado a la creación de una corriente nueva de investigación, desarrollada recientemente por grupos de científicos que postulan que los cambios involucrados



en comportamientos complejos, si bien se basan en la actividad de las neuronas, son procesos extensamente distribuidos y en primer término que deben ser entendidos como parte de las redes neuronales.^{7,8} Dentro de esas escuelas de pensamiento, existen grupos que explican los fenómenos neurofisiológicos no sólo como procesos distribuidos en la red que los cimienta, sino además como procesos que se autoorganizan y que requieren por tanto de nuevas herramientas de análisis para su definición e interpretación, como la dinámica de sistemas no lineales.

En la cada vez más abundante literatura de quienes se incorporan a este enfoque podemos encontrar títulos que se antojan escapados de la novelas de ciencia-ficción, como "Controlando el caos cardiaco" o "Exploración rápida de al-

ternativas vía caos". Con la intención de mostrar la riqueza de esta alternativa, aún de manera breve, pero siguiendo una línea de trabajo muy documentada, damos a conocer los resultados y conclusiones de un grupo de investigadores de la Universidad de Berkeley quienes, bajo la dirección de Walter Freeman, se han dedicado al estudio de diversos aspectos y distintos momentos del funcionamiento del sistema olfatorio durante los últimos 20 años.⁹⁻¹³

Inicialmente, estos investigadores hicieron la caracterización, mediante técnicas electroencefalográficas, de la actividad neuronal producida en el bulbo olfatorio de conejos que eran entrenados para identificar un olor, los cuales recibían un premio cuando la identificación era positiva, se trataba pues de una tarea conductual discriminativa.¹¹ Se

guardaba registro de la actividad eléctrica durante el proceso de aprendizaje y una vez que éste se encontraba perfectamente establecido. Un arreglo de electrodos de 8 x 8 distanciados 0.5 mm les permitió el registro de actividad de una amplia región, aproximadamente 20% de la superficie del bulbo olfatorio, con lo que se obtuvieron patrones de actividad que típicamente contenían ondas lentas con ráfagas de oscilaciones en la banda de las ondas gamma (35-90 Hz). Notablemente, encontraron que estas ondas de actividad eran comunes en los 64 canales de registro, es decir, no existían poblaciones de neuronas en el bulbo olfatorio que se activaran selectiva o preferencialmente con cada aroma presentado.

Por lo tanto, la información relevante para la diferenciación de los olores

que es capaz de realizar el animal no existía en las variaciones temporales entre poblaciones estimuladas, es decir, en la amplitud de las ondas (figura 2a), sino que la hallaron contenida en todo el patrón espacio-temporal que el conjunto de los 64 registros constituye, el cual fue estudiado mediante curvas de nivel como las usadas en topografía, o las curvas isopotenciales de la física (figura 2b).

En la situación previa al condicionamiento o con estímulos que no fueron reforzados, los patrones de actividad permanecieron estables; cuando los estímulos aplicados fueron reforzados para producir el condicionamiento, los patrones espaciales de actividad se modificaron con respecto a la situación control. Debe enfatizarse, nuevamente, que el patrón característico que podía asociarse a cada aroma condicionado estaba globalmente distribuido en el bulbo olfatorio, es decir, la información que podía participar en el reconocimiento de diferentes olores no estaba contenida en un grupo particular de los canales de registro analizados

Con los datos obtenidos, los investigadores elaboraron un modelo del estado base (no condicionado o control) y de la emergencia de patrones espaciales globalmente distribuidos (estados condicionados), para lo que emplearon ecuaciones diferenciales no lineales que simulaban la dinámica del sistema olfatorio (figuras 3 y 4).

La interpretación de los datos experimentales y la simulación computacional reveló que el reconocimiento de los olores es un proceso neuronal autoorganizado que pasa por la transición de estados sucesivos. Dicha transición arranca de lo que estos autores llamaron estado de reposo o base. El modelo indica que ante la presentación de un estímulo en forma reiterada se establecen relaciones sinápticas excitatorias y bidireccionales entre pares de neuronas, las cuales son reforzadas mediante la activación repetida, tal como lo establece el clásico postulado de Hebb. Este estado de activación reiterada conduce a la formación de un ensamble neuronal para cada estímulo olfatorio, que involucra en su inicio aproximadamen-

te a 1% de las células del bulbo y que se conserva inalterado mientras no varíen las condiciones de estimulación; de ahí que la excitación de cualesquiera de sus elementos conduzca a la activación de todo el ensamble. Así podría explicarse por qué al recibir algunas de las moléculas correspondientes a cierto aroma, aunque se nos presenten mezcladas con otras y de manera distinta a como fueron inicialmente aprendidas, ocurra un proceso que "atraiga" la percepción hacia el reconocimiento del olor respectivo.

El concepto de ensamble neuronal es fundamental en el enfoque teórico del grupo de Freeman y comprende tres aspectos: a) genera el patrón mismo; b) traslada y generaliza el estímulo a otros receptores equivalentes, amplificando las pequeñas señales que se producen por excitación a unos cuantos receptores durante una sola inhalación, además le asocia un patrón de activación estereotipado a cada estímulo, y c) constituye un mecanismo cambiante, plástico, mediante el cual pueden establecerse los patrones de actividad específicos

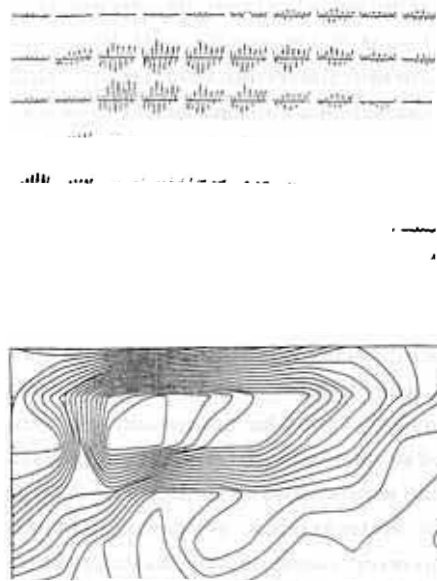


Figura 2

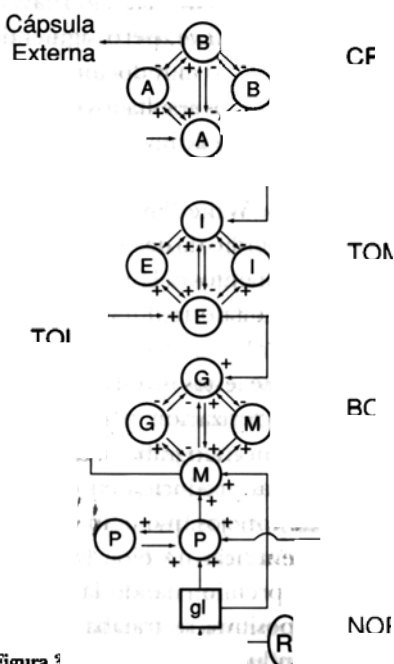


Figura 3

Figura 2. Patrones de onda comunes. A. Señales de voltaje de los 64 canales de registro electroencefalográfico, nótese que sólo la amplitud de las ondas varía, no su patrón temporal. B. Mapa de contornos asociado al registro de las señales de voltaje (modificada de Freeman, 1991).

Figura 3. Diagrama de flujo para las ecuaciones del sistema olfatorio. Cada círculo representa una ecuación de segundo orden no-lineal. R: receptor; NOP: nervio olfatorio primario; gl: glomérulos; P: células periglomerulares; M: c. mitrales; G: c. granulares; TOI: tracto olfatorio lateral; BO: bulbo olfatorio; c. piramidales superficiales del núcleo olfatorio anterior; E: excitatorias; I: inhibitorias; A: c. de la corteza piriforme; B: inhibitorias; TOM: t. olfatorio medio; CP: corteza piriforme. Excitación - inhibición (modificada de Skarda & Freeman, 198

Figura 4. Flujo de información entre la corteza y bulbo olfatorios con otras regiones cerebrales del sistema olfatorio (modificada de Freeman, 1991)

y globales que se asocian a cada aroma.

Al emplear las nociones de la dinámica no lineal, los autores han definido los patrones de actividad producidos para cada estímulo en particular como las "cuencas de atracción" del sistema de reconocimiento olfatorio. De esta manera, se constituyen los patrones de actividad que llegan hasta la corteza durante una inhalación y que se sugiere son la señal relevante para las correlaciones que usualmente se asocian a la memoria y al aprendizaje, en este caso de aromas. Durante la exhalación el bulbo retorna a su nivel basal, con actividad de fondo, en espera de un nuevo estímulo ambiental.

En este modelo la percepción no es un proceso pasivo o reflejo, *no se inicia* cuando un estímulo activa los receptores, sino que se inicia cuando dentro del organismo se genera una actividad neuronal autoorganizada, promovida por la motivación de un premio en el caso de los conejos, o el interés por identificar un determinado olor en nuestro caso, que establece las bases para el procesamiento futuro de los estímulos recibidos

por el organismo. Por lo tanto, es el cerebro el que establece las condiciones para el procesamiento perceptual al generar patrones de actividad que determinan qué tipo de información de los receptores será procesada.

La *percepción* dicen estos autores, la *percepción olfatoria* diríamos nosotros, es un proceso dinámico autoorganizado que se inicia en el cerebro que deja de responder a estímulos irrelevantes y acepta los estímulos persistentes, se reorganiza funcionalmente y se modifica según la información que recibe. Luego entonces la percepción olfatoria no "copia" simplemente los objetos, sino que les crea un significado para el organismo. La percepción es así un proceso interactivo de desestabilización y reestabilización que se lleva a cabo por medio de dinámicas no lineales.

En este modelo el caos determinista es esencial para el funcionamiento normal del cerebro a muchos niveles. Lo que antes se consideró "ruido" del cual los investigadores buscaban afanosamente deshacerse, resulta ahora parte relevante de la señal (véase también

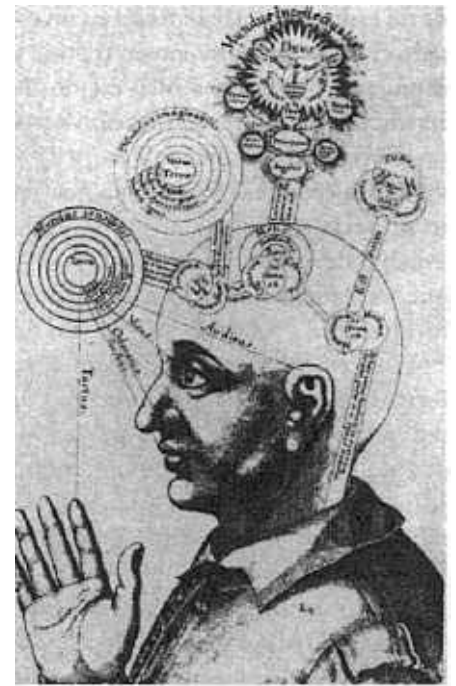


figura 4). Para establecer una comparación con este enfoque, recordemos que en los modelos de regulación homeostática, poder restablecer las condiciones basales o de equilibrio cuando han ocurrido perturbaciones "ruidosas", constituye la propiedad crucial para la vida de los organismos. Sin embargo, para enfrentarse a situaciones nuevas y manipular un entorno siempre cambiante, los sistemas homeostáticos deben "desestabilizarse" y producir patrones nuevos de actividad. La esencia de estos nuevos modelos es mostrar que las perturbaciones, fluctuaciones e inestabilidades pueden realmente proteger la integridad de los sistemas biológicos y explicar muchas de sus propiedades.

¿Es ubicua la presencia de dinámicas caóticas en el funcionamiento del sistema nervioso? ¿Qué ventajas tendría esto? Para Freeman y Skarda la primera respuesta es sí, y entre las ventajas se encuentran: 1) la actividad basal caótica le permitiría al sistema estar siempre en un estado reactivo, listo para responder, independientemente de la presencia o no

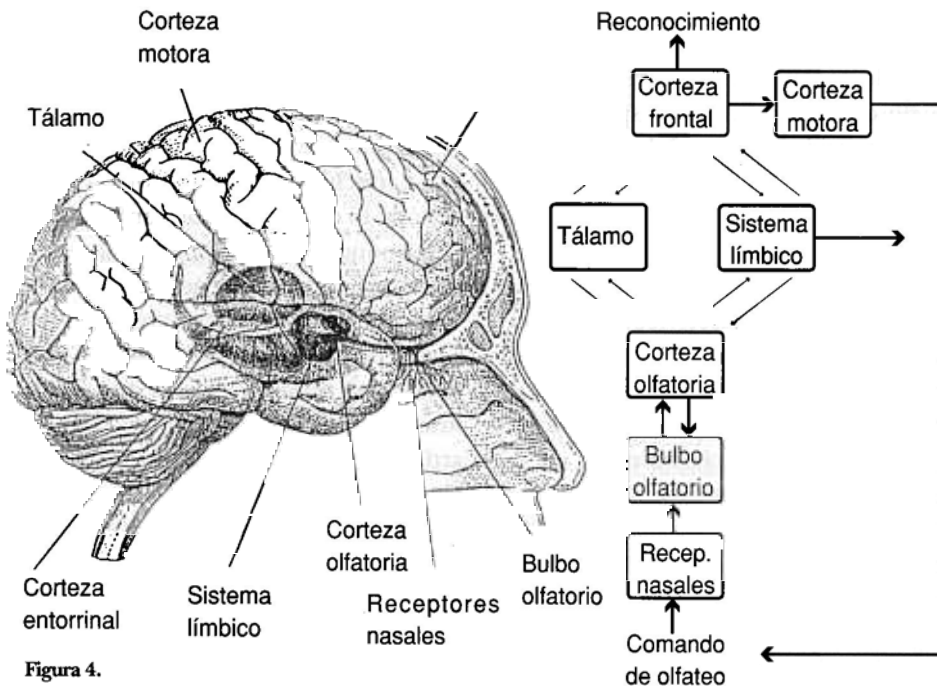


Figura 4.

de un estímulo, permanecería en un estado cuasiestable, pero no en reposo, y dispuesto a transitar a otro estado de actividad. Sin ella la percepción sería un proceso terriblemente lento, y 2) la dinámica caótica en el sistema nervioso no sería sólo una consecuencia inevitable de su gran complejidad, sino que sería además esencial para crear información.

El cerebro no procesa cualquier información que reciben sus receptores sensoriales, es selectivo, y esta selectividad de cuál información es relevante para el organismo no le es impuesta desde el exterior, no se establece de antemano qué es ruido y qué es información, sino que el cerebro tiene que realizar esta selección. Los patrones de actividad autoorganizados constituyen la base de esta selectividad futura, determinan qué información será admitida y qué nuevo patrón espacio-temporal de actividad tendrá asociado.

Extendiendo la mirada

El modelo desarrollado por Freeman y colaboradores para la percepción olfatoria es probablemente el ejemplo más acabado, hasta la fecha, de la aplicación de estas teorías en la neurofisiología. Poco a poco las dinámicas no lineales, caóticas y los procesos de autoorganización se van generalizando como herramientas de análisis. Entre otros casos podemos mencionar que los estudios de la actividad locomotora han encontrado en ellas un apoyo importante. Por ejemplo, los circuitos neuronales generadores de patrones de actividad se identifican ahora como osciladores,⁷ dispuestos tanto en el cerebro como a lo largo de la médula espinal o de las cadenas ganglionares. Se ha visto que son susceptibles de acoplarse entre sí, o bien de constituir nuevos circuitos funcionales; estas transiciones se pueden entender como corrimientos de fase, multiestabilidad o bifurcaciones.

Experimentos en sinapsis elementales, es decir, en sistemas compuestos por sólo dos neuronas, también poseen varias propiedades dentro de sus patrones de actividad que caen dentro de los comportamientos de sistemas dinámicos no lineales.¹⁵

Confinamiento de fase. Característica básica de cualquier marcapaso celular, pues se refiere a su propiedad de oscilar con un periodo preciso y, además, a la capacidad para extender su comportamiento a las estructuras vecinas.

Intermitencia. Las señales intermitentes se describen como regulares la mayor parte del tiempo, confinadas, pero con fluctuaciones ocasionales, grandes y transitorias, es decir, se trata de patrones que cambian rara vez pero en forma muy marcada.

Bifurcaciones. La transición ocasional entre dos estados estacionarios debida a una perturbación en el sistema.

Para lograr muchas de estas descripciones se recurre a las gráficas de series de tiempo o mapeos de Poincaré, por lo que se refuerza la idea de que los métodos geométricos derivados del análisis de sistemas dinámicos ofrecen un valioso complemento a los análisis estadísticos clásicos.

Otro ejemplo interesante de las ventajas de las soluciones gráficas aplicadas incluso al estudio de las respuestas reflejas, consideradas generalmente como respuestas estereotipadas, lo tenemos en la representación mediante diagramas de fases de las variaciones en la actividad electromiográfica durante un reflejo inhibitorio masetérico, las cuales se observan en el modelo desarrollado por el grupo de Biofísica del Control Neuromuscular que dirigió hasta su muerte Carlos García Moreira, en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

El reflejo inhibitorio masetérico es una respuesta automática del sistema nervioso que protege las mandíbulas y los dientes de un esfuerzo o impacto excesivos durante la masticación. Pue-

de estudiarse experimentalmente al solicitar a un paciente que haga un esfuerzo controlado por retroalimentación visual. Cuando el nivel de actividad cumple ciertas condiciones, se aplica de manera automatizada un pequeño golpe al mentón que ocasiona el reflejo inhibitorio; con lo anterior se persigue que en cada paciente se parta de condiciones similares en la actividad del sistema de control que se quiere estudiar. Después de analizar las características de la respuesta —latencia, duración total, relación de áreas, etc.—, han podido describirse cuatro patrones normales de respuesta, así como diversas alteraciones.¹⁶

Cuando se emplearon diagramas de fase para describir estas mismas respuestas, se encontró que en los pacientes sanos el diagrama describe siempre una trayectoria cerrada compuesta de dos asas, independientemente de la morfología que tuviese su registro electromiográfico. Es decir, esta trayectoria representa el ciclo límite de cualesquiera de las condiciones consideradas sanas, y en ellas lo más notable es el regreso a las condiciones iniciales. En cambio, en los pacientes con daño en la articulación temporomandibular, los diagramas presentaron trayectorias que se alejaron invariablemente de su punto de partida, por lo que se ha perdido el ciclo límite original.¹⁷

La conclusión que se puede obtener de todo lo dicho anteriormente es que la introducción de las herramientas de análisis de la dinámica no lineal está revolucionando nuestras explicaciones acerca del funcionamiento del sistema nervioso, y no sería extraño que en un futuro no lejano nos encontremos con artículos sobre "La estructura fractal de los afectos", en los cuales se explique por qué algunas conductas contradictorias se encuentran tan intrincadamente mezcladas. Desde luego, no pensamos que las dinámicas no lineales esclarecerán todas las preguntas, pero sin

duda representan una nueva forma de responderlas y, sobre todo, de reformularlas.

Agradecimientos

Deseamos agradecer a Ismael Espinosa y a Pedro Miramontes su revisión y comentarios del texto. ✻

Bibliografía

- 1) *Revista de la Universidad Nacional Autónoma de México*, no. 540; 1995.
- 2) *Mundo Científico (La Recherche en español)* 115(11), julio-agosto de 1991.
- 3) Garfinkel A. A Mathematics for physiology. 1983. *Am.J.Physiol.* 245 (Reg. Intg. Comp. Physiol.) (4): R455-R466.
- 4) Elbert, T., W.J. Ray, Z.J. Kowalik, J.E. Skinner, K.E. Graf y N. Birbaumer. 1994. Chaos and physiology: deterministic chaos in excitable cell assemblies. *Physiol. Rev.* 74(1):1-47.
- 5) Rall, W. y J. Rinzel. 1973. Branch inputs resistance and the steady attenuation for input to one branch of a dendritic neuron model. *Biophys. J.* 13: 648.
- 6) Lynch, G. 1986. *Synapses, Circuits and the Beginnings of Memory*. MIT Press, Cambridge.
- 7) Cohen, A.H., S. Rossignol y S. Grillner. 1988. *Neural Control of Rhythmic Movements in Vertebrates*. J. Wiley & Sons.
- 8) Espinosa, I. 1991. Los robots flexibles y las redes neuronales. *Ciencias*. No. Esp. 5:89-103.
- 9) Freeman, W.J. 1991. The Physiology of Perception. *Sci. Amer.* Febrero: 78-85.
- 10) Freeman, W.J. 1992. Tutorial on neurobiology: from single neuron to brain chaos. *Inter. J. Bifur. and Chaos*, 2(3): 451-482.
- 11) Freeman, W.J. y J. Schneider. 1982. Changes in spatial patterns of rabbit olfactory EEG with conditioning to odors. *Psychophysiology* 19:44-56.
- 12) Skarda C. A. y W. J. Freeman. 1987. How brain make chaos in order to makes sense of the world. *Behavioral and Brain Sciences* 10(2):161-195.
- 13) ———. 1990. Chaos and the new science of the brain. *Concepts in Neuroscience* 1(2):275-285.
- 14) Segundo J.P., J.F. Vibert, K. Pakdaman, M. Stiber y O. Diez Martínez. 1994. "Noise and the neurosciences: a long history, a recent revival



Martin Schongauer, siglo XV

and some theory", en K.H. Pribram (ed.) *Origins: Brain and Self Organization*, Lawrence Erlbaum Associates Pub, Nueva York.

- 15) ———, E. Altshuler, M. Stiber, y A. Garfinkel. 1991. Periodic inhibition of living pacemaker neurons (I) locked, intermittent, messy and hopping behaviors. *Inter. J. Bifurc. and Chaos*, 1(3):549-581.
- 16) García Moreira C., Ángeles Medina F., J. García Ruiz, A. Nuño Licona y Raúl Llanos Rivas. 1989. Primeros resultados clínicos de la reflexi-

metría masticatoria. *Rev. Mex. Ing. Biomed.* 10:37-53.

- 17) García Moreira C., H. González Gómez, F. Ángeles Medina y J. García Ruiz. 1993. Evaluación del control muscular masticatorio mediante registro en el plano de fases. *Rev. Mex. Ing. Biomed.* 15(1):85-93.

Hortensia González y Humberto Arce: Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM.