

LA COMPLEJIDAD DEL CEREBRO, EL DELICADO Y ROBUSTO BALANCE ENTRE ORDEN Y ANARQUÍA

Palabras clave: función cerebral, criticalidad, complejidad.
Key words: brain function, criticality, complexity.

Se discuten recientes intentos de comprender la compleja dinámica cerebral a gran escala adoptando enfoques y herramientas de la física estadística. Se resumen las motivaciones iniciales y los resultados más relevantes de este programa.

We discuss recent attempts to understand complex brain dynamics at large scale using approaches from statistical physics. We summarize the initial motivations and the most relevant results of this research program.

■ **Dante R. Chialvo**

CEMSC3, Center for Complex Systems & Brain Sciences. Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín, 25 de Mayo y Francia, San Martín (1650), Buenos Aires, Argentina. & Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Godoy Cruz 2290, Buenos Aires, Argentina

E-mail: dchialvo@unsam.edu.ar

■ LAS LEYES DEL CEREBRO PODRÍAN SER MUY SIMPLES

La complejidad del cerebro fascina a todos y en ocasiones se argumenta que en esa complejidad reside nuestra mera incapacidad por entender su funcionamiento. Algo similar ocurre cuando se presupone que la biología no podría ser estudiada por la física, puesto que “las leyes de la física son simples pero la naturaleza es compleja”. Es decir se asume que si algo “luce” complejo las leyes que lo originan debieran ser también complejas. Del mismo modo se ha perpetuado la idea de que la complejidad de la naturaleza es casi inaccesible, argumentándose que el carácter cambiante y diverso de los objetos naturales impide su estudio a través de herramientas matemáticas, por el contrario se

podría pensar que (Glass y Mackey, 1989):

“... si la complejidad de los eventos que observamos en el cerebro fuese a ocurrir en un objeto inanimado, digamos en un fluido turbulento o en una reacción química, ese fenómeno sería sometido a un escrutinio extremo que incluiría las más sofisticadas herramientas y modelos matemáticos.”

Adhiriendo con el espíritu de esta reflexión, este ensayo pretende ilustrar esfuerzos recientes que estudian la función cerebral con herramientas que la física estadística utiliza desde hace tiempo en el estudio de los fenómenos colectivos complejos (Chialvo, 2010). En las próximas secciones introduciremos progresi-

vamente el problema de la complejidad y como su origen se relaciona con criticalidad. Los ejemplos que usaremos a modo de prueba tienen la intención de persuadir al lector que las mismas leyes simples rigen fenómenos complejos muy dispares, lo que se conoce como universalidad. Finalmente en las últimas secciones se discutirán los más recientes avances en el uso de estos conceptos aplicados al estudio de la dinámica espacio-temporal cerebral.

■ LA RECETA DE LA COMPLEJIDAD: UN POCO DE ORDEN Y OTRO POCO DE DESORDEN

¿De dónde surge la complejidad que nos rodea? Desde hace ya tiempo se sospecha que la respues-

ta yace en la frontera entre el orden y el caos. Como lo ilustra la Figura 1, se intuía que un grupo aparentemente desconexo de fenómenos, todos ellos con el mote de complejos, exhibían un nivel intermedio de orden y desorden, incluyendo a la vida misma, el cerebro, los lenguajes, las proteínas, la turbulencia en fluidos, la dinámica lenta de los vidrios, por citar sólo algunos.

Claramente, aquello que se repite (como en el orden extremo) no nos parece difícil de explorar, cómo sería el caso de una estructura cristalina. Del mismo modo no luce complejo aquello que erráticamente cambia (en el extremo de la anarquía) como es el caso de las trayectorias de las moléculas de un gas.

En cambio aquello que ocasional y súbitamente deja de ser monótono (sea en el espacio o en el tiempo) nos sorprende y pasa a ser algo intrigante y complejo. Esa mezcla justa y balanceada de orden y desorden, o de sorpresa y aburrimiento constituye comúnmente la carta de presentación de la complejidad. Ejemplos cotidianos abundan, tenemos el caso de la música donde hay un balance entre sorpresa y repetición, evitándose la excesiva monotonía o la frecuente sorpresa. Otro ejemplo, involucrando aspectos espaciales, podrían ser las impresiones digitales, todas similares y distintas al mismo tiempo. Podríamos preguntarnos si la complejidad de la mezcla que observamos está relacionada con la complejidad del mecanismo que la genera. En otras

palabras: ¿deberíamos suponer que para fabricar la “mezcla” justa de algo complejo se requeriría de leyes nuevas y más complejas que aquellas necesarias para generar el orden o el desorden? Por el contrario, veremos que complejo no es lo mismo que complicado (Cuadro 1) y que las mismas leyes simples pueden explicar lo simple y lo complejo.

■ FASES Y UNIVERSALIDAD

Quizás por ser una experiencia tan cotidiana, no advertimos que en la naturaleza la materia se nos presenta en unas pocas “fases” o estados, por ejemplo el agua mayormente en tres: líquido, sólido y gas. Es importante notar que a pesar de las grandes diferencias cualitativas entre las tres, exactamente las mismas leyes físicas rigen el comportamiento de sus moléculas constituyentes. Un cambio relativamente pequeño en la temperatura o la presión, origina muy diferentes conductas colectivas de las mismas moléculas; en otras palabras estos cambios colectivos monumentales, que se reflejan como diferentes fases, no requieren de leyes diferentes o más complejas.

Usaremos como ejemplo el caso del agua. El vapor de agua es un gas a nivel macroscópico y si lo observásemos con un potente microscopio podríamos contar billones de moléculas de agua moviéndose alocadamente en cualquier dirección, a más velocidad cuanto mayor fuese la temperatura del vapor. Si enfriásemos lentamente ese gas, veríamos que las moléculas se van moviendo más despacio, y que comienzan a formarse pequeños grupos. Esto ocurre porque, al disminuir la temperatura, las atracciones mutuas entre las moléculas comienzan a vencer a la tendencia al desorden que le imprime la agitación térmica y las moléculas tienden a juntarse.

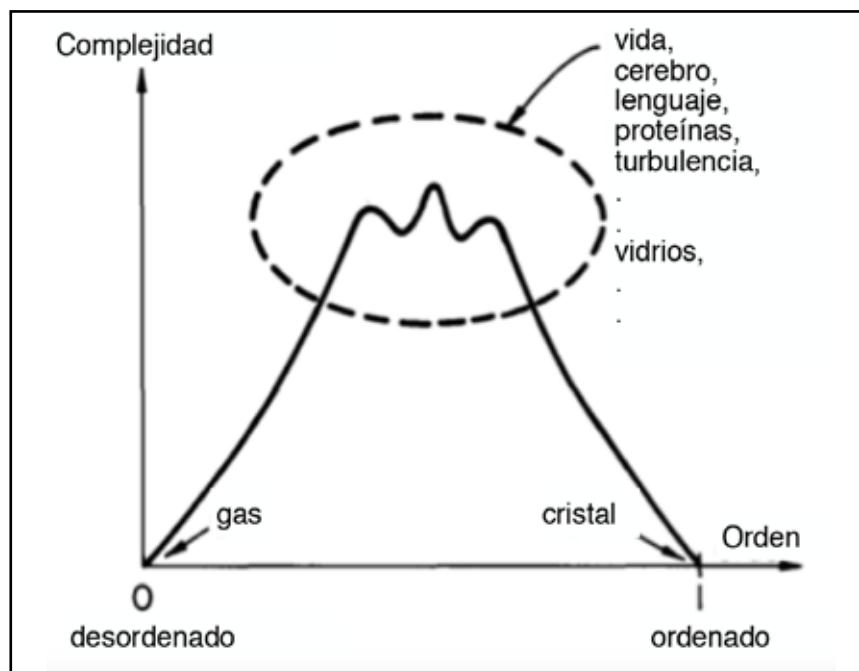


Figura 1: Ni el excesivo desorden de un gas ni el orden extremo de las moléculas de un sólido son percibidos como complejos, pero si aquellos estados de la materia y los fenómenos que están asociados a niveles intermedios de orden y desorden, tal como lo ilustrara Hans Frauenfelder en este diagrama de hace cuatro décadas. En esa región intermedia, mezcla de orden y anarquía, es donde habitan los fenómenos más complejos, incluyendo la vida, el lenguaje, las proteínas, la turbulencia, los estados vidriosos, etc. (Redibujado de Frauenfelder (1987)).

Eventualmente, los pequeños agrupamientos iniciales siguen captando moléculas, formándose gotas de agua, cuando la temperatura es inferior a los 100 grados centígrados. Si la temperatura siguiere bajando las fuerzas atractivas entre moléculas comienzan a jugar un papel cada vez más importante frente a la agitación térmica y al llegar a 0 grados, serán capaces de producir estructuras microscópicas regulares, originando así la solidificación del agua en hielo. Estos dos cambios (de condensación o solidificación y viceversa) se llaman en física cambios (o transiciones) de fase. Hasta no hace más de un siglo se pensaba que estos cambios suponían un reemplazo de una cosa por otra, vapor por agua y ésta por hielo, pues se consideraba que la materia era continua. Esta visión continuó hasta que, en los albores del siglo XX, se confirmara que la materia era conjuntos de átomos y así se pudo advertir que los cambios de fase involucran a las mismas moléculas cambiando su conformación. Es interesante notar que coincidentemente Ramón y Cajal rompía también la idea existente de que el cerebro era un *sincitio*, al identificar histológicamente la sinapsis y demostrar entonces la naturaleza discreta del sistema nervioso.

Cambios de fase ocurren en toda la materia que nos rodea y su estudio se ha sistematizado en las últimas décadas en una gran variedad de fenómenos colectivos que ocurren toda vez que un gran número de elementos no lineales interactúan. Se sabe, por ejemplo, que las correlaciones entre las partes que componen un sistema obedecen reglas estadísticas idénticas, sin importar si los elementos constituyentes son neuronas, hormigas, granos de arena o moléculas de agua. En todos los casos la misma teoría explica como el sistema se ordena o desordena,

qué tipos de conductas colectivas pueden esperarse, cuán estables o inestables serán, cómo se las puede perturbar, etc. El hecho de que todos estos fenómenos dispares obedezcan las mismas leyes es lo que se conoce en física como "universalidad".

Aceptar que las mismas leyes rigen y explican fenómenos aparentemente muy dispares es un proceso de generalización no exento de dificultades. Basta imaginar a Galileo Galilei tratando de persuadir a los teólogos que los cuerpos celestiales estaban regidos por las mismas leyes que una vulgar piedra o una efímera pluma. Es obvio que protestarían: ¿cómo pretender que aquellos majestuosos cuerpos circulando los espacios donde reinan los dioses van a seguir las mismas reglas que rigen a estos mundanos objetos? Hoy se admite con facilidad la necesidad de usar las mismas leyes para describir las oscilaciones de un columpio y las evoluciones de planetas en sus órbitas, pero todavía sólo una minoría está inclinada a aceptar que todas las leyes de la física han de imperar, por ejemplo, en el mundo de la neurociencia. Eso explica la reticencia a admitir que las interacciones entre una multitud de neuronas puedan desencadenar fenomenologías colectivas que cualitativamente son equivalentes a las que observamos, por ejemplo, como producto de la interacción entre átomos de un metal.

■ UN EJEMPLO DE COMPLEJIDAD ENTRE EL ORDEN Y EL DESORDEN

Para describir el escenario universal de la complejidad que aparece en los cambios de fase tomaremos el caso ilustrativo de la magnetización, un ejemplo de fenómeno colectivo por excelencia. La Figura 2 muestra como se comporta un trozo de hie-

rro sometido a un campo magnético externo, a medida que se aumenta la temperatura. Sin entrar en detalles, los átomos tienden a alinear sus momentos magnéticos con los de sus vecinos inmediatos. A su vez, esta tendencia al orden compite con la agitación que la temperatura produce. Si la temperatura es baja, el estado final del sistema será ordenado con todos orientados en el mismo sentido. Primero debemos escoger una variable que nos permita seguir la evolución del sistema. Una medida simple del grado de orden-desorden del sistema en este caso es la magnetización. Ésta es máxima cuando prima el orden (es decir donde el imán adquiere la configuración que nos es familiar: con un polo norte y uno sur) y mínima cuando prima el desorden, es decir cuando los momentos magnéticos vecinos se orientan al azar. Lo típico aquí es que a medida que aumenta la temperatura el sistema se desordena. La temperatura en que la curva se acerca a cero, marcada como T crítica, es lo que se conoce como punto crítico.

Los ejemplos en los tres paneles intermedios en la Figura 2 muestran una imagen instantánea del estado en que se encontraría cada minúscula región del hipotético imán, donde con blanco o negro representamos la orientación magnética norte o sur. Como se ve, a muy bajas temperaturas casi todas coinciden en su orientación, es decir, el orden se impone; mientras que a muy altas temperaturas es claro que impera el desorden y hay alternancia de pequeñas regiones vecinas entre si pero de orientaciones opuestas. Si bien los patrones espaciales que vemos son distintos, son homogéneos a través del sistema. La complejidad de estos patrones puede ser evaluada de muchos modos, uno de ellos denominado "complejidad algorítmica" lo estima com-

putando la longitud del algoritmo necesario para describir ese estado. Si el patrón a evaluar es repetitivo y homogéneo –como en los casos

extremos– entonces la complejidad será mínima. En cambio, la complejidad es más alta a temperaturas cercanas al punto crítico, pues el patrón

espacial corresponde a una compleja mezcla de desorden y orden. Allí impera una gran heterogeneidad: vemos “islotes” negros (que indican

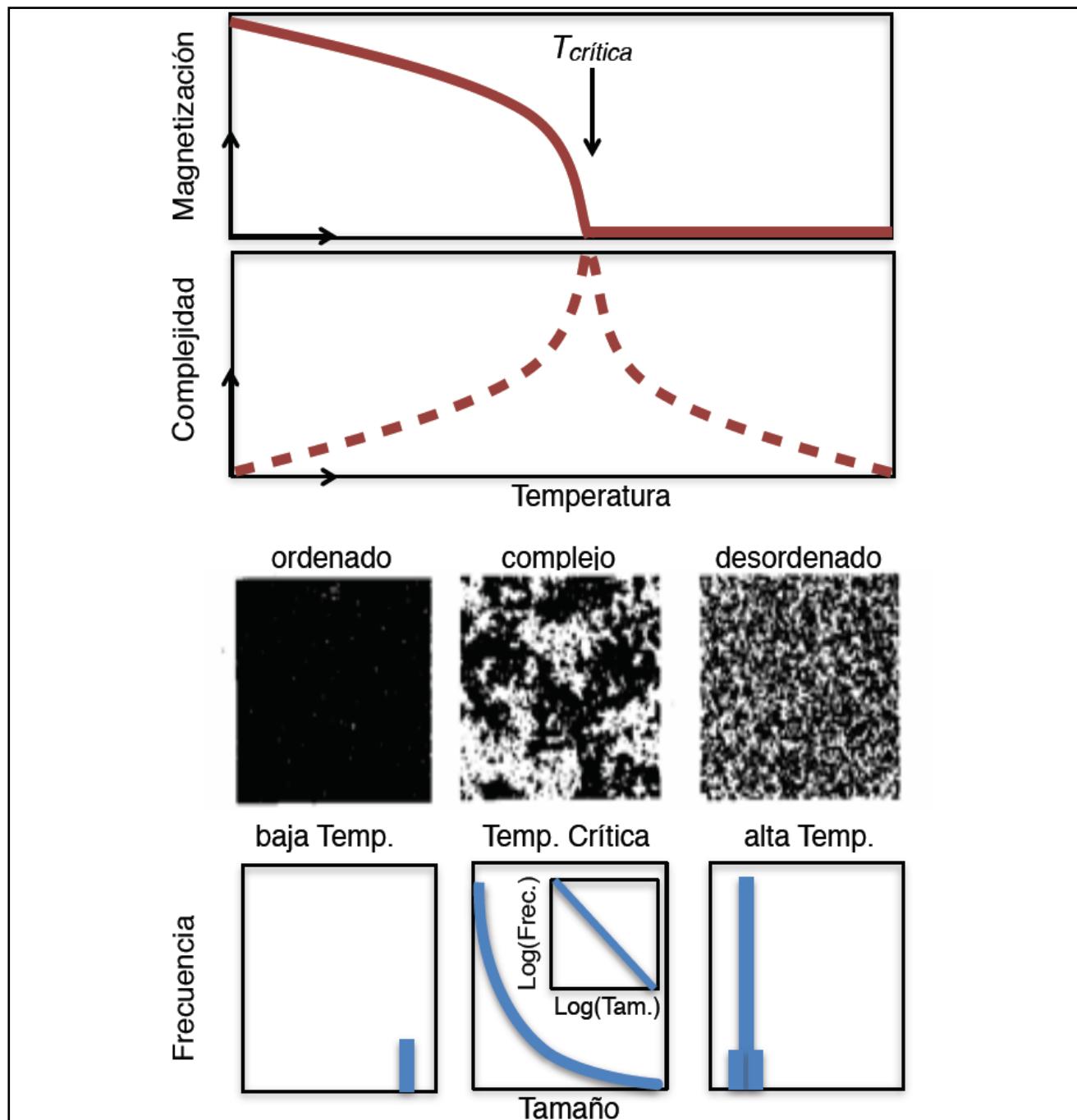


Figura 2: Ejemplo de transición de fase, una de las más frecuentes “fábricas” de complejidad en la naturaleza. Los dos paneles superiores ilustran el cambio de la magnetización y de la complejidad de un material ferromagnético como función de la temperatura. Debajo, se muestran ejemplos de tres estados del sistema: ordenado (temperatura baja), desordenado (temperatura alta) y cercano a la temperatura crítica (complejo). Los gráficos inferiores ilustran la distribución del tamaño de los “islotes” de igual orientación (es decir, igual color), la cual es muy homogénea para temperaturas extremas, pero es libre de escala cercano a criticalidad. Los sistemas complejos muestran, en su gran mayoría, este tipo de distribuciones de tamaños de estados, que cuando se grafican en doble logaritmo (como en el diagrama inserto) resultan en una línea recta.

coincidencia de una orientación) de todos los tamaños, que contienen a su vez "lagunas" blancas, también de todos los tamaños, por lo que su complejidad es máxima.

En ellos se verifica que, al contrario de los extremos, cercano al punto crítico no existe un tamaño preferido para los islotes o las lagunas, por ello se dice que los patrones observados son "libres de escala". Esta ausencia de escala resulta en una función continua (mientras que en los extremos existe solo un valor preferido) obedeciendo una ley de potencias, $P(S) \sim 1/S^\beta$, donde β es el exponente que caracteriza la distribución de tamaños S . Este tipo de función es distintivo del comportamiento de los sistemas complejos, y se lo reconoce fácilmente cuando haciendo logaritmos en ambos ejes nos queda una línea recta, como se ilustra en el panel central inferior de la Figura 2.

La complejidad puede también estimarse en las fluctuaciones en el dominio del tiempo. Si midiésemos la magnetización como función del tiempo veríamos que en ambos extremos de temperatura las fluctuaciones son mínimas, mientras que cercanos al punto crítico es típico observar que episodios de quietud pueden ser interrumpidos de tanto en tanto por grandes variaciones, las que nunca se detienen. Como el lector debe haber ya adivinado, las variaciones de la magnetización en el tiempo son también "libres de escala", un reflejo de que en los sistemas complejos la dinámica espacial y la temporal son dos caras de la misma moneda.

El principio de universalidad que estamos comentando sugiere que el modo en que la complejidad emerge en el ejemplo de la magnetización del hierro será visto también en cambios de fase de sis-

temas muy dispares entre sí, como ser una bandada de pájaros, un conjunto de neuronas, una sociedad de agentes de bolsa comprando y vendiendo, etc. Veremos ahora que la dinámica cerebral, tema central de este ensayo, es regida también por estas propiedades universales.

■ LA COMPLEJIDAD ES SIEMPRE CRÍTICA

Los párrafos anteriores resumen una de las lecciones de la física estadística: complejidad y criticalidad son casi sinónimos. En particular, la dinámica de un sistema complejo parece ser la de un sistema cuando se acerca a un punto crítico de transición de fase orden-desorden. Permite el lector que por conveniencia ignoremos por el momento cómo "se las arregla" un sistema dado para alcanzar la criticalidad. Lo cierto es que cerca de ese punto se comienzan a observar patrones que exhiben una mezcla de orden y desorden: ni todos los elementos microscópicos del sistema hacen lo mismo, ni cada uno se comporta aleatoriamente. De esta manera, aumenta el "repertorio" de patrones que el sistema es capaz de exhibir.

Esta combinación de tendencias colectivas de orden y desorden es fundamental para la adaptabilidad del colectivo: necesita de una cierta regularidad para funcionar, pero también debe ser flexible y variable para adaptarse a cambios en su ambiente. Pensemos en el caso del cerebro: si todas las neuronas se comportaran de pronto de la misma manera, estaríamos presenciando un ataque epiléptico. En el otro extremo, si cada neurona se comportara aleatoriamente, no habría intercambio de información ni el mínimo consenso. En ambos casos, de extremo orden o extremo desorden, es inconcebible que el cerebro le sea útil a un organismo para obtener co-

mida, defenderse de los predadores o aparearse; el trío fundamental requerido para la supervivencia de las especies. En cambio, cerca del punto crítico el cerebro dispone del mayor repertorio de neuronas excitadas o apagadas con el que pueda producir las más diversas conductas, o emociones o el fenómeno macroscópico que se quiera considerar. Así mismo, debido al hecho que en criticalidad el sistema es muy susceptible a perturbaciones, un cerebro crítico le permitiría al individuo explorar rápidamente opciones frente a cambios inesperados del ambiente.

■ LA COMPLEJIDAD CEREBRAL ES CRÍTICA

Hemos explorado desde hace un tiempo la idea que la complejidad del funcionamiento del cerebro esté asociada a la existencia de cambios de fase y dinámica crítica, comenzando con los trabajos iniciales en los 90's en colaboración con el desaparecido físico danés Per Bak, quien primero propusiera mirar al cerebro desde esta óptica (Bak, 1996). Un impulso significativo lo dieron, en 2003, los experimentos de Beggs y Plenz (2003) al proveer las primeras evidencias claras de dinámica crítica en el cerebro. Ellos describieron, en cultivos de neuronas, un fenómeno que denominaron "avalanchas neuronales", un patrón espacial de activación eléctrica de la corteza cerebral en las que cascadas de actividad se propagan por todo el sistema. Estos investigadores hicieron uso de una preparación experimental que les permitía seguir la propagación de estos eventos mediante una grilla de electrodos, que se activaban toda vez que neuronas en su vecindad se activaban (Figura 3A). Cuando estudiaron la distribución de los tamaños de estas cascadas, no encontraron tamaños preferidos sino que demostraron ser, como en el ejemplo del magnetismo, libres de

escala. Es decir, cuando se grafican estas avalanchas en ejes de doble logaritmo (ver Figura 3B) se delinea una función que sigue una línea recta, tal como lo viéramos para el caso de la transición ferromagnética. Este hallazgo, y sus posteriores repliaciones en diversas condiciones, despertó mucho interés e impulsó la investigación sobre el tema.

Por razones de espacio, aquí solo nos referiremos a los experimentos en humanos utilizando técnicas de neuroimágenes, en los que hemos participado de manera más activa. Estas técnicas de registro usan la resonancia magnética funcional (fMRI por sus siglas en inglés), que mide

la actividad cerebral de manera indirecta al detectar cambios en la oxigenación sanguínea, lo que está asociado al consumo metabólico producido por las neuronas que se encuentran activas. Con esta técnica se obtiene, en cada segundo de registro, una imagen de todo el cerebro, parcelada en miles de cubos de unos pocos milímetros denominados voxels. De esta manera, los datos finales representan la actividad neuronal a través del tiempo de miles de minúsculas regiones cerebrales.

Utilizando estos datos hemos explorado como el cerebro se acerca y se aleja del punto crítico, aún en un estado en que el cerebro “no hace

nada”. Se podrá el lector preguntar qué podríamos aprender observando un cerebro al que no se le “hace hacer algo”? Bien, la respuesta está en un resultado clásico de la física: el teorema de fluctuación-disipación. El mismo predice que en sistemas complejos la varianza de las fluctuaciones espontáneas –que el cerebro las tiene y en abundancia– es proporcional a la respuesta que obtendríamos si lo perturbásemos (“hacerle hacer algo”). Confidados en ello, hemos investigado estas fluctuaciones usando una transformación sencilla que estudiaremos con Enzo Tagliazucchi en su trabajo de licenciatura. Para ello, se escogen los momentos en que la señal de los

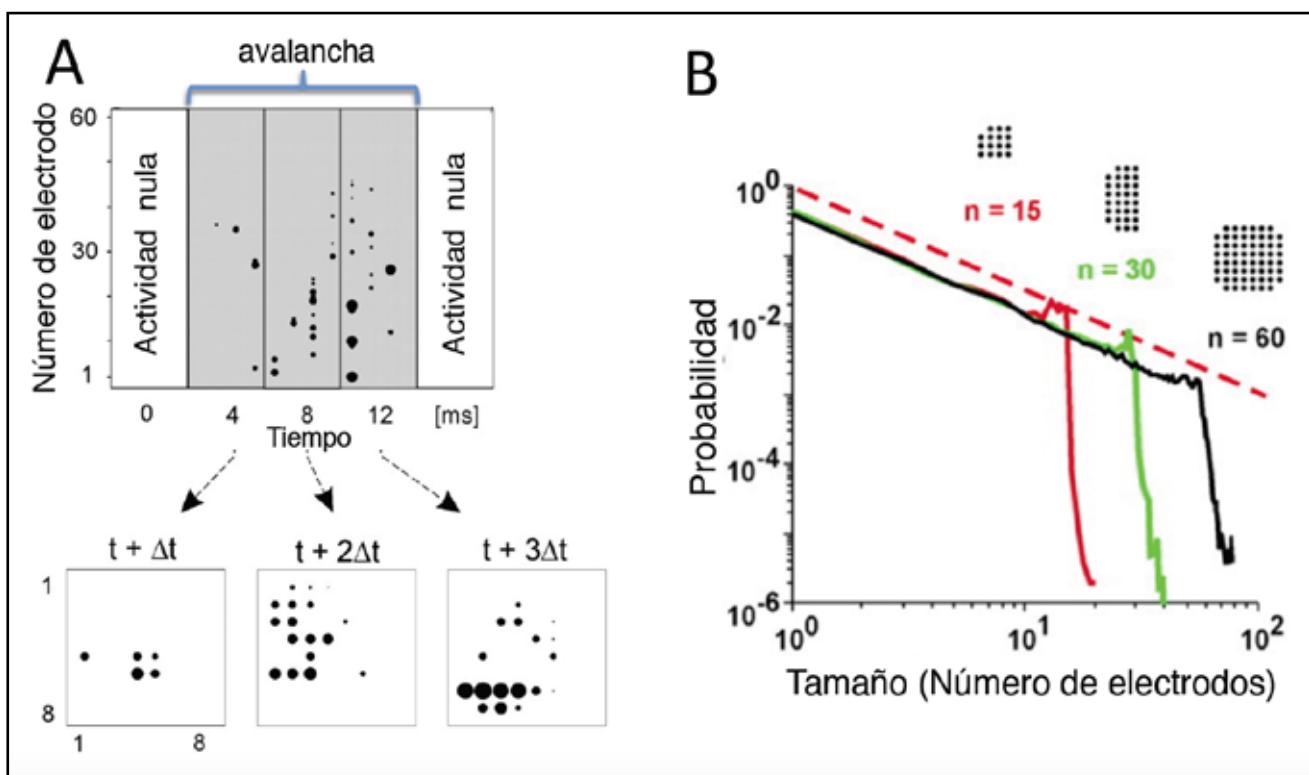


Figura 3: Las avalanchas de actividad neuronal son críticas (y complejas): Panel A: Las avalanchas son salvajes de descargas neuronales (en el panel superior ilustradas con puntos en alguno de los 64 electrodos dispuestos en una grilla de 8x8) separadas por períodos de quietud, con duración y tamaño muy variable. En este ejemplo la avalancha persiste por 12 ms. y recorre un total de 38 electrodos (número que define su tamaño), como lo muestra la secuencia en los tres paneles inferiores. En ellos están dibujados la localización de aquellos electrodos que en ese paso de tiempo han censado actividad. Panel B: La distribución del tamaño de las avalanchas sigue una ley de potencias (línea punteada), es decir, libre de escala. Se grafica la probabilidad relativa de que ocurra una avalancha de un dado tamaño. Observar avalanchas aún mayores sólo es limitado por el tamaño del sistema, como lo demuestran los tres ejemplos que registran en sistemas de 15, 30 o 60 regiones. Redibujado de Beggs y Plenz (2003).

registros de resonancia magnética funcional supera un umbral dado. Esta transformación genera entonces un nuevo tipo de señal, a la que se refiere como "proceso de puntos". A pesar de ser una simplificación extrema, ésta no viene acompañada de pérdida de información y a su vez permite, como veremos, seguir en forma continua y con gran fidelidad la actividad cerebral. Con esta técnica se logra describir la dinámica cerebral siguiendo la

evolución de estos puntos en tiempo y espacio, como si fuesen estrellas en el cielo. En analogía, podemos mirar si hay "constelaciones", dónde están, cuántas son, qué tamaño tienen, cómo se mueven, cuáles son sus propiedades estadísticas, etc.

A pesar de su extrema simplificación, este tipo de análisis revela una serie de resultados muy interesantes, los que son resumidos en la Figura 4 y que ahora pasamos

a describir. A cada paso de tiempo se cuenta el número total de puntos (es decir sitios cerebrales activados), lo que fielmente representa el grado de actividad cerebral en ese momento. También se determina la localización espacial de cada uno de los puntos y se los agrupa con los que resultan ser vecinos, como si fuesen racimos. Cuando se analizaron estos datos se observó que el número y el tamaño de los racimos, cambia constantemente con el tiem-

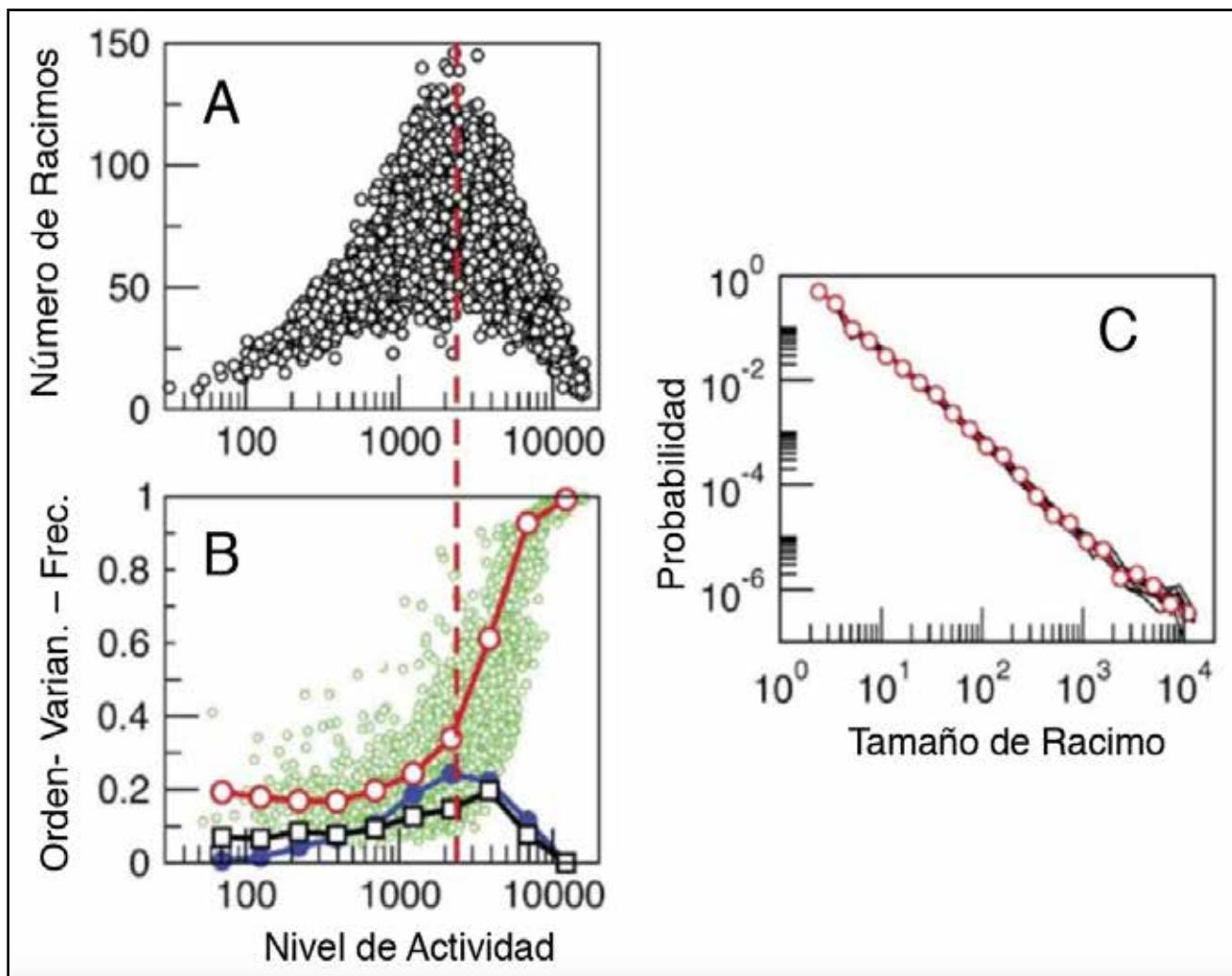


Figura 4: La actividad cerebral registrada con resonancia magnética funcional fluctúa alrededor de una transición de fase, la mayoría del tiempo en un estado cercano a criticalidad. Panel A: Número de racimos (eje vertical) en función del nivel de actividad. La línea vertical punteada denota el máximo. Panel B: Parámetro de orden (promedio indicado con círculos vacíos conectados con línea roja continua y la nube de puntos en símbolos verdes) y su varianza (cuadrados y línea continua negra) en función también del nivel de actividad. Los círculos llenos (cuyo máximo se corresponde con el de los datos en el panel A) corresponden con la frecuencia en que se observa un dado nivel de actividad. Panel C: Representación logarítmica de la probabilidad de observar cada tamaño de racimo, indicando invariancia de escala. Redibujado de Marro y Chialvo (2017).

po. Aún así, a pesar de estas fluctuaciones surge un patrón dinámico reconocible. Para verlo hay que dibujar, como se ilustra en el panel A de la Figura 4, el número de agrupamientos en función del número de sitios activados. La imagen resultante sugiere que durante las fluctuaciones espontáneas de actividad existe una proporción relativamente intermedia de sitios activos en el cerebro, con un máximo número de agrupamientos posibles (y un notable máximo en su variabilidad). Este sencillo análisis parece ser ya capaz de sugerir un cambio de fase en la actividad cerebral.

Para hacer más cuantitativas estas consideraciones, y compararlas con otros sistemas, primero se calcula a partir de los datos un parámetro de orden, equivalente a la magnetización comentada para el ejemplo en la Figura 2. Aquí se lo define (en cada instante) como el tamaño del racimo más grande. A su vez el nivel de actividad, ya definido, se puede considerar como un parámetro de control (equivalente a la temperatura en la Figura 2). Ahora, dibujando el parámetro de orden en función del parámetro de control surge la curva sigmoidea en el panel B, la cual sugiere la existencia de un cambio de fase al incrementarse la actividad. Confirmando este indicio, la varianza del parámetro de orden muestra un máximo que localiza esa posible transición. Recordemos que en criticalidad existe siempre la mayor variabilidad.

Dado que el nivel de actividad fluctúa tres órdenes de magnitud, corresponde preguntarse con qué frecuencia el cerebro está cerca de criticalidad. Esto se hace midiendo la frecuencia con la que el sistema se encuentra en cada nivel de actividad. Lo que se encuentra es que, en efecto, el cerebro pasa relativamente más tiempo (ver círculos llenos en

Figura 4B) alrededor de una zona de transición de actividad moderada que en los extremos de baja o alta actividad. Por último, el gráfico de la Figura 4C demuestra que la estadística del tamaño de los racimos de actividad sigue una ley de potencias, la que es característica de criticalidad, como ya comentásemos para el ejemplo de magnetismo.

El comportamiento de la curva con forma de campana en la Figura 4A es también muy familiar en física, siendo otra manifestación de universalidad. En estudios de tráfico vehicular, esta forma funcional (allí conocido como "diagrama fundamental") se observa cuando uno representa el flujo de vehículos pasando por un sitio control en función de la densidad de vehículos ocupando un tramo de la carretera. Es típico que para densidades relativamente bajas, este flujo crezca proporcionalmente con la densidad; es decir cuantos más vehículos hay mayor el flujo a través de un punto de la carretera. Pero para densidades más altas el flujo decrece, al superarse el máximo crítico que permite la vía, punto en el que ocurren los odiosos embotellamientos. Tal como lo vemos en el cerebro, es típico también que la variabilidad del tránsito tenga un máximo cercano al punto crítico, es decir el tiempo que lleva hacer el mismo recorrido, cuando la densidad es crítica, es altamente variable.

Las curvas de la Figura 4 A y B muestran entonces cómo el cerebro espontáneamente parece fluctuar entre dos situaciones asociadas, en un extremo, con poca actividad (donde solo hay unos pocos y pequeños racimos o agrupamientos de sitios simultáneamente activos – como un cielo despejado con unas pocas nubes pequeñas–) y, en el otro extremo, con mucha actividad (donde el racimo es enorme –como cuando el cielo está encapotado–).

Recientes experimentos realizados por Robert Leech y colegas (2014) en el Imperial College de Londres han replicado fielmente estos resultados en animales, sugiriendo que el fenómeno es robusto.

Otro aspecto de la función cerebral que proponíramos estudiar con estas mismas ideas es la conciencia, ese algo que desaparece en el sueño profundo (cuando al despertar no podemos reportar dónde estábamos) y que reaparece en la vigilia. Giulio Tononi es quien más ha trabajado en cuantificar este aspecto subjetivo (y único) de la conciencia humana, a través de ingeniosos experimentos y argumentos teóricos (Tononi y cols., 2016). Sin dejar de admitir que ella existe sólo en "primera persona" su argumento teórico central establece que la conciencia es un estado en donde la capacidad de simultáneamente integrar y separar información es máxima. La simultaneidad de estas propiedades opuestas aparece como una contradicción, sin embargo esta coexistencia es necesaria para explicar las propiedades más fundamentales de la experiencia consciente.

En su formulación original Tononi visualiza las interacciones en el cerebro en tres fases o estados, uno muy segregado, otro muy integrado y el intermedio, que contendría una mezcla de segregación e integración correspondiente al estado natural de la conciencia (ver Figura 5A). Se puede apreciar una clara similitud de los extremos de segregación o integración con los estados gaseoso y sólido respectivamente que comentáramos al inicio. Así mismo se advierte que el estado crítico, intermedio a estos extremos, reúne las condiciones adscritas por Tononi para el estado consciente.

La teoría de Tononi, conocida como Teoría de Información

Cuadro 1: ¿Universal y complejo o diseñado y complicado? ¿Qué tienen en común una bandada de pájaros, un conjunto de neuronas, una sociedad de agentes de bolsa comprando y vendiendo, o moléculas de agua interaccionando entre sí?: comparten las mismas propiedades que los definen como sistemas complejos. Todos los sistemas complejos poseen tres propiedades comunes: (1) están compuesto por un número muy grande de partes o elementos, (2) que interactúan entre sí, y (3) cada uno de ellos obedece o reacciona a reglas no lineales. De estas condiciones emergen, usualmente, conductas colectivas inesperadas: la conciencia, de la interacción de millones de neuronas; el mercado financiero, de la interacción de muchos agentes de bolsa; el vuelo coordinado, de enormes bandadas de pájaros, etc. Inesperadas porque el comportamiento detallado de un sistema complejo no puede ser anticipado a partir del conocimiento detallado de los elementos constituyentes aislados. No existe nada en una molécula de agua que prediga la existencia del vapor, por ejemplo. Sin embargo, todos estos fenómenos emergentes, aún difiriendo en su forma de expresión, poseen propiedades estadísticas idénticas o, en otras palabras, universales.

Los sistemas complejos podrán confundirse con aquellos que sólo lo son en apariencia. Estos últimos, a los que llamaremos complicados, también se componen de muchos elementos, pero en general son manufacturados y obviamente solo actúan dentro del plan creado por su diseñador, como es el caso de un automóvil o un televisor. De esta manera, si bien son el resultado de una intrincada conexión de piezas y cables, nada "emerge" espontáneamente de la interacción de sus elementos, sino que su funcionamiento está perfectamente definido ya en su construcción. Tampoco poseen reglas universales: entender las reglas que rigen el funcionamiento de un televisor no nos sirve para comprender el funcionamiento de un automóvil.

La universalidad exhibida por los sistemas complejos no es algo menor: permite que lo aprendido acerca de un fenómeno emergente en un sistema dado ayude a comprender fenómenos presentes en otras disciplinas, aún muy diferentes.

Integrada (o "IIT" su sigla del inglés por "Integrated Information Theory") no abre juicio con respecto a de qué modo se logaría tal coexistencia; en otras palabras no propone un mecanismo neuronal que lleve al cerebro a poseer tales propiedades. Hemos propuesto hace tiempo que la solución al problema de obtener diferentes fases no reside en cambiar las interacciones sino en interpretarlo como un cambio en las correlaciones, tal como ocurre en los cambios de fase. Según esta noción, la estructura de las conectividades del cerebro, es decir las interacciones, puede ser inmutable, podría entrar (y salir) del estado consciente ajustando un solo parámetro, en analogía con la temperatura en el ejemplo del agua o del ferromagnetismo. El panel B de la Figura 5 ilustra, desde nuestra perspectiva, la correspondencia del estado consciente con el estado crítico.

■ OTRAS DIRECCIONES

Los resultados de esta línea de tra-

bajos aclaran cual es la dinámica espaciotemporal del cerebro, es decir como se mueve la actividad eléctrica por toda la extensión del cerebro, aún cuando éste no haga nada. La universalidad que comentásemos, nos permite cruzar fronteras y por ello, una analogía burda que solemos hacer es describir estos estudios como de "meteorología cerebral". En ese sentido, un eufemismo que nos permitimos es decir que el conocer los patrones de clima cerebral en condiciones saludables nos permitirá entender cómo se producen las tormentas patológicas, las sequías, etc., y en suma cómo proceder si quisiésemos recuperar un clima cerebral saludable.

Los resultados fundamentales usualmente originan más nuevas preguntas que respuestas. En este sentido, además del estudio del cerebro sano bajo la óptica de la física estadística, recientemente hemos investigado la integridad cerebral en diversas condiciones fisiopatológicas. Por ejemplo, en los

trabajos más recientes estudiando registros de resonancia magnética funcional en voluntarios humanos hemos mostrado que los diferentes grados de conciencia son análogos a los cambios cualitativos observados en las transiciones de fase ya discutidas aquí. Desde esa perspectiva, el estado de vigilancia correspondería al estado crítico, mientras que el sueño profundo o la pérdida de la conciencia debido a anestesia general son consistentes con un estado subcrítico. Por otro lado, hemos propuesto que las alteraciones de la conciencia producida por alucinógenos corresponderían a un estado supercrítico si se considera que la entropía de estados se ve incrementada.

Una mención especial debe hacerse al modelado matemático de estos resultados, algo que Ariel Haimovici estudiara con nosotros en su trabajo de doctorado. Para ello se construyó un modelo usando datos de la conectividad entre regiones del cerebro (obtenidas del llama-

do proyecto Human Connectome <http://www.humanconnectomeproject.org>) e introduciendo una regla dinámica no-lineal muy simple simulando la dinámica neuronal. Sus resultados demostraron que se puede replicar la totalidad de la dinámica cerebral observada experimentalmente, solo con sintonizar el modelo a una región cercana al punto crítico. Estos resultados abren la fascinante posibilidad de construir y explorar cerebros computacionales “virtuales”, sólidamente basados en datos experimentales, donde explorar las consecuencias de lesiones, alteraciones, cirugías de resección, etc.

En este ensayo hemos querido persuadir al lector que algunas ideas de la física estadística pueden proveer de una vista novedosa, diferente y provechosa al estudio del cerebro. Hay razones para ser optimista, ya que la idea parece estar madurando, a juzgar por el impacto que reciben los reportes científicos usando estas ideas, por la aparición de libros que condensan los resultados de diferentes laboratorios, y por el creciente número de reuniones científicas dedicadas al tema. A pesar de que una “teoría del cerebro” está aún extremadamente lejos, creemos que este traspasoamiento de métodos sofisticados de la física

estadística hacia las ciencias del cerebro está moviendo la disciplina en esa dirección.

BIBLIOGRAFÍA

Bak P. (1996) *How nature works: The science of self-organized criticality*. New York: Springer Science.

Beggs J.M., Plenz D. (2003) Neuronal avalanches in neocortical circuits. *Journal of Neuroscience*, 23, 11167.

Chialvo D.R. (2010) Emergent complex neural dynamics. *Nature Physics*, 6, 744.

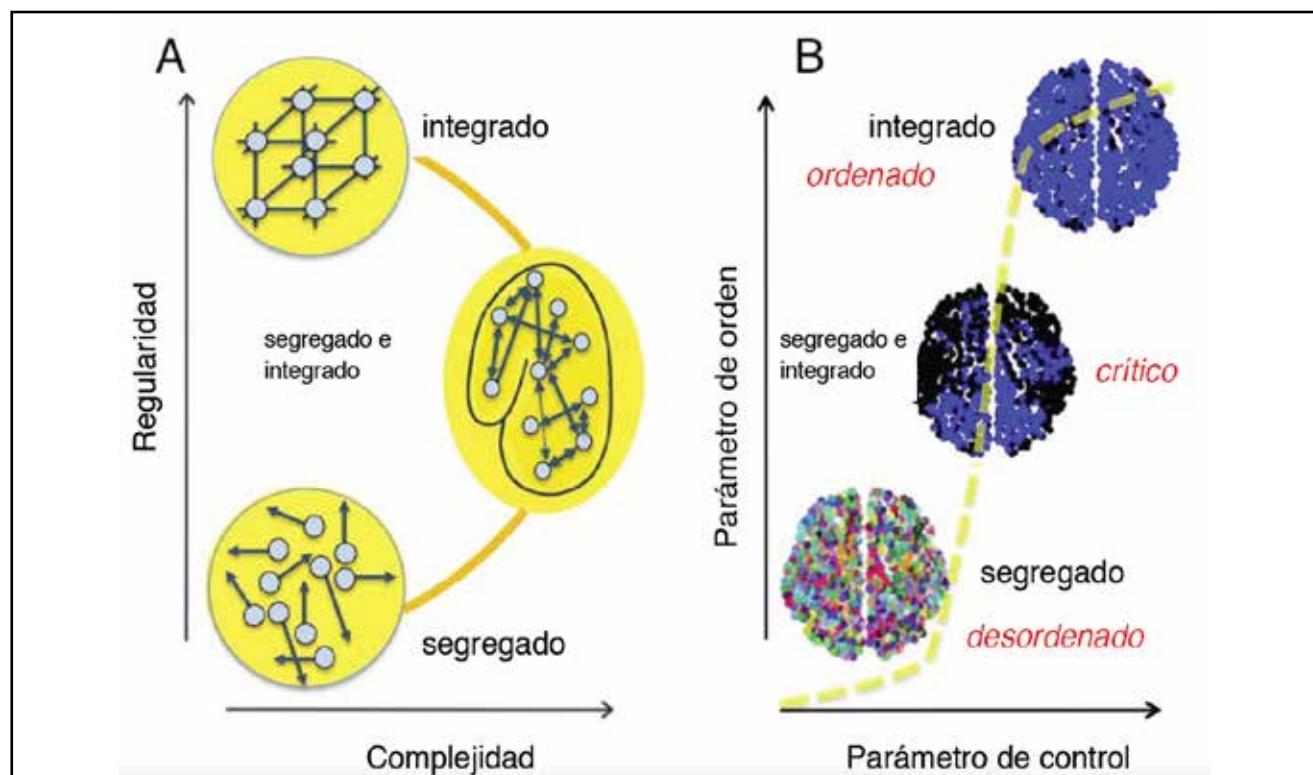


Figura 5: El estado consciente, según las teorías predominantes, es caracterizado por la capacidad de máxima integración-segregación de información. En el Panel A se muestra el punto de vista estructural usado por Tononi en el cual diferentes grados de regularidad en las interacciones (o conexiones) de una red neural le pueden conferir más o menos capacidad de segregación o integración. El Panel B muestra nuestra alternativa dinámica por la cual, en principio cualquiera de los tres regímenes –con mayor o menor complejidad – se podría generar dinámicamente por el mismo sistema (sin cambio en las conexiones) si es capaz de mostrar cambios de fase continuos. Los varios colores en los tres gráficos identifican los diferentes racimos de actividad, de modo que en el régimen más ordenado (arriba a la derecha) todo el cerebro está activo, mientras que en el más desordenado (abajo a la izquierda) cada región actúa independientemente. Solamente en criticalidad (gráfico intermedio) se pueden observar racimos coherentes de todos los tamaños, obteniéndose así el óptimo del balance de integración-segregación.

- Frauenfelder, H. (1987) Function and dynamics of myoglobin. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 504, 151–167.
- Glass L., Mackey M.C. (1988) From clocks to chaos: The rhythms of life, Princeton University Press.
- Haimovici, A. et al. (2012) Brain organization into resting state networks emerges at criticality on a model of the human connectome. *Physical Review Letters* 110, 178101.
- Marro, J., Chialvo, D.R.. (2017) La mente es crítica. Descubriendo la admirable complejidad del cerebro. Editorial Universidad de Granada, España.
- Scott, G. et al. (2014) Voltage imaging of waking mouse cortex reveals emergence of critical neuronal dynamics. *The Journal of Neuroscience*, 34, 16611–16620.
- Tagliazucchi, E. et al. (2012) Criticality in large-scale bra-
- in fMRI dynamics unveiled by a novel point process analysis. *Frontiers in Physiology*, 15.
- Tononi, G. et al.. (2016) Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 450–461.

■ NOTAS

¹La cita original dice “en la naturaleza”



El artículo 41 de la Constitución Nacional expresa:

Todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano, y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes, sin comprometer las de las generaciones futuras.

Para ello, trabajamos en el Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (3iA) en docencia, investigación y desarrollo tecnológico.

3iA



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INGENIERÍA AMBIENTAL
www.unsam.edu.ar