

¿LOGRARÁ LA FÍSICA COMPRENDER LA MENTE?

Reseña del trabajo publicado en la revista *Scientific Reports* (20 de Julio 2015) con el título “Brain Performance versus Phase Transitions” por Joaquín Torres y Joaquín Marro del Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional de la Universidad de Granada (www.nature.com/articles/srep12216; referencia DOI: 10.1038/srep12216).

Los físicos saben describir con fidelidad matemática situaciones singulares y casi dramáticas que genéricamente denominan *cambios de fase*. Es el caso del agua cuando solidifica, adoptando una estructura tan diferente de la de partida que ya no hablamos de agua, y cuando se hace vapor, que puede extenderse sin límite por todo el espacio aunque apenas haya cambiado de volumen al ir calentándola hasta llegar a esa situación. También es el caso de esos materiales que, por simple enfriamiento, adquieren cualidades de imán, o esos que provocan levitaciones que parecen milagrosas. Se sabe que alguna propiedad cambia espontánea y bruscamente en todos estos casos, y que puede hacerlo de modo tan sustancial que los físicos hablan de cambios “infinitos”. Además, una condición —cuya espectacularidad los físicos subrayan llamándola “crítica”— tiende a establecerse rápidamente por todo el sistema, de manera que cualquier parte consigue influir en cualquier otra a la vez que es influida por todas ellas. Y es que se ha producido entonces una extensión súbita de correlaciones —no hay parte que permanezca independiente del resto— lo que hace al sistema capaz y asombrosamente eficaz para llevar a cabo las más difíciles tareas. En este estado de extraordinaria cooperación, en el que las querencias y discrepancias entre los elementos del sistema compiten con aleatoriedades, es cuando se propagan complicados estados de orden por el sistema y emergen nuevas propiedades, incluso aquellas sorprendentes acciones a distancia.

La fenomenología asociada con cambios de fase es en la práctica aún más bizarra y fascinante de lo que indican estas pautas pues, en lugar del equilibrio ideal que describe la termodinámica, en la naturaleza reinan las irregularidades espaciales y temporales. Es el caso de cerebros evolucionados, como se ha hecho evidente en estudios recientes usando resonancias magnéticas, tomografía por emisión de positrones, encefalografías y delicadas sondas. De hecho, como consecuencia de este renovado interés por el cerebro, muchos investigadores han notado que su estructura y sus funciones parecen asociadas con cambios de fase y criticidad. Tratando de explicar estas sorprendentes observaciones, Joaquín Torres y Joaquín Marro, en el Instituto Carlos I de la Universidad de Granada, han estudiado *redes de neuronas* matemáticas que imitan a esas redes naturales de conexiones que dan soporte a nuestra mente. Estos investigadores modelan las neuronas como ecuaciones en derivadas parciales que se relacionan según un entramado de interacciones, que llaman sinápticas, con la peculiaridad de que suponen que la intensidad de estos enlaces cambia con el tiempo siguiendo la actividad en cada entorno.

La conducta que emerge de esa compleja cooperación, cuyos detalles se inspiran en minuciosas observaciones de los neurobiólogos, dibuja un sugestivo escenario.

Para empezar, los investigadores granadinos han detectado y caracterizado con detalle en su modelo hasta siete comportamientos cualitativamente distintos, o *fases* (de colores en la parte alta de la figura 1). Los cambios ocurren (para una excitabilidad I_0 dada) al variar un parámetro D que describe el nivel de “ruido”, esto es, la suma de señales aparentemente aleatorias que provienen de otras partes del sistema o del exterior. Estas fases incluyen los familiares estados mentales de reposo completo o discontinuo, sincronizaciones neuronales totales, parciales o cambiantes con el tiempo, recuperación de memorias,... y situaciones muy dinámicas que recuerdan nuestros estados de vigilia y atención. Además, al perturbar el sistema con una señal débil, la correlación C de ésta con la respuesta que produce muestra con claridad seis picos bien definidos (curva en la parte inferior de la figura 1) que señalan con claridad las transiciones entre las fases que se observan.

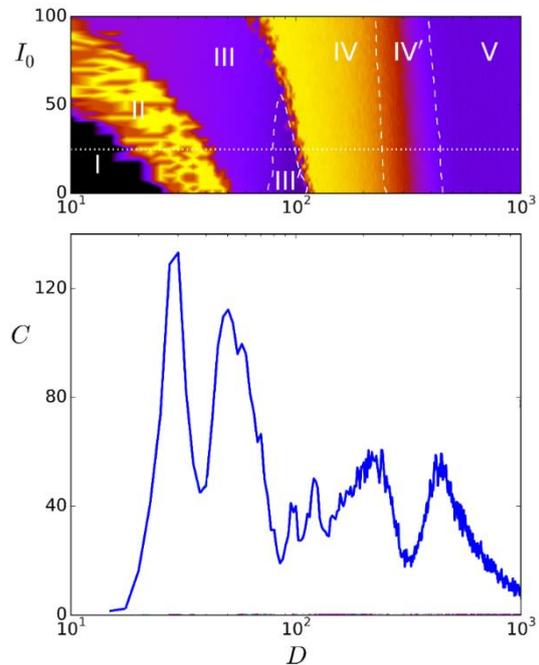


Figura 1. Distintas fases detectadas en la red neuronal (identificadas aquí variando el color en el gráfico superior) y correlación C entre un estímulo y la respuesta del sistema en presencia de un nivel de “ruido” D . Esta correlación, que puede medirse en experimentos como el de la figura 2, presenta picos allí donde hay un cambio de fase.

Esta conducta sugiere preparar sencillos experimentos psicofísicos como el esquematizado en la figura 2. Se trata de estimular el cerebro con una señal débil —tal como, por ejemplo, suaves soplos de aire sobre los ojos— y monitorizar cómo se propaga

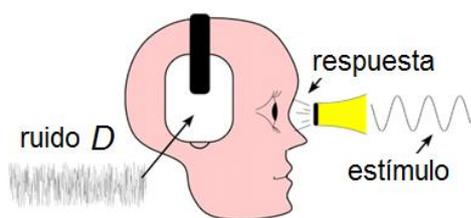


Figura 2. Esquema de experimento psicofísico para medir la correlación C entre un estímulo y la respuesta del sistema en presencia de un “ruido” D .

por nuestra red neuronal mientras compite con otro ruido —tal como un sonido cuya intensidad puede ir modificándose. Se supone que el estímulo es procesado por las neuronas y que éstas reaccionan provocando sincronizados parpadeos como respuesta y defensa. Sin embargo, las neuronas también están siendo perturbadas por el ruido D , de modo que pueden no ser capaces de sincronizarse adecuadamente con los soplos.

La figura 1 sugiere dos hechos notables. Uno es que, para ciertos valores del parámetro ruido D , correspondientes a los picos de la curva C , la transmisión es buena, pues hay una correlación significativa entre el estímulo y su respuesta. Esto es en principio

sorprendente, pues contrasta con la usual propagación del sonido en el aire y de una onda en la superficie de un lago tranquilo, que van sistemáticamente amortiguándose hasta su extinción. Sin embargo, ese tipo de comportamiento ya ha sido observado en los llamados “medios excitables”, de modo que el cerebro se nos muestra aquí como un ejemplo de éstos. De hecho, este fenómeno —llamado a veces “resonancia estocástica”, por cuanto es el carácter aleatorio del medio y sus circunstancias lo que favorece la propagación de la débil señal para ciertos niveles de ruido— ha sido observado en un experimento similar al que ilustra la figura 2. El segundo hecho notable que revela la figura 1 es que, si la propagación se optimiza para ciertos valores de D es precisamente porque éstos se corresponden con una sensibilidad o susceptibilidad extra que sabemos es característica de las transiciones entre fases. En consecuencia, sencillos experimentos de propagación como el esquematizado en la figura 2 han de ser capaces de detectar los cambios más significativos en la actividad mental, lo que sin duda ha de abrir un vasto campo para el estudio experimental.

Como un resultado adicional notable, Torres y Marro también demuestran que las propiedades emergentes del modelo son robustas, esto es, poco sensibles a posibles modificaciones en los detalles del modelo, particularmente, los referidos a la forma topológica de la malla de interacciones. Por ejemplo, dentro de límites razonables, la situación que refiere la figura 1 apenas cambia si se supone que todos los nodos están conectados entre sí, o bien que se trata de una malla aleatoriamente diluida en la que faltan muchas conexiones o de una malla cuya estructura se repite prácticamente invariable en todas las escalas, o en su lugar es una red familiar en la naturaleza de un tipo llamado “pequeño mundo”,... Tampoco hay cambios significativos si se usan datos recientes referidos, por ejemplo, a nuestro *conectoma* (figura 3), esto es, la red de conexiones entre regiones cerebrales. Y el modelo aclara de este modo cómo (y por qué) es un rápido centelleo de las sinapsis lo que controla de hecho la complejidad de la red y, por tanto, la capacidad de computación y proceso que tiene el cerebro y la fenomenología que de él emerge por cooperación entre todos sus elementos.



Figura 3. Arquitectura de las fibras de materia blanca, que informa acerca de la relación entre regiones cerebrales, cortesía del proyecto *Human Connectome*.

Confirmando y extendiendo la versatilidad y utilidad de su modelo, los investigadores de Granada están ahora adaptándolo para comprender cómo cambian esos fenómenos emergentes relacionados con funciones mentales al considerar distintas mallas de interacciones según los datos que están siendo disponibles para especies animales distintas. Quizá este camino lleve a averiguar qué nos hace a los humanos diferentes.