

La Mente es Crítica

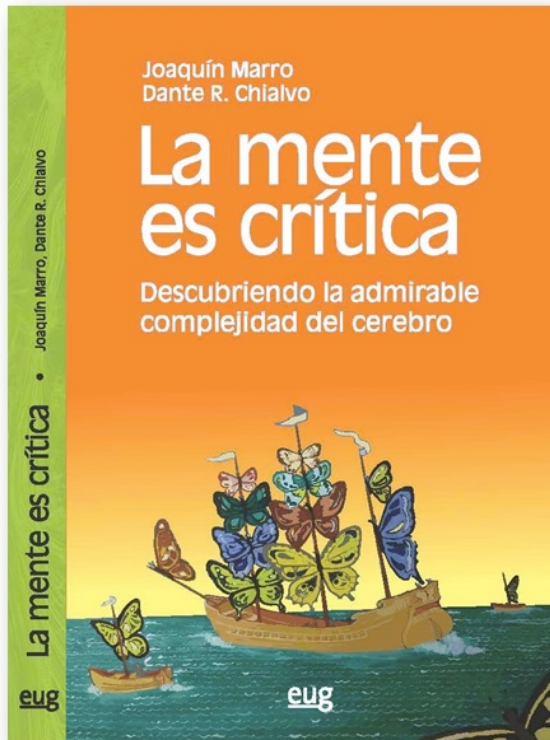
DESCUBRIENDO LA ADMIRABLE COMPLEJIDAD DEL CEREBRO

Joaquín Marro y Dante R. Chialvo

Índice

Prólogo	9
1. <i>Prima Donna</i>	19
La <i>cosa</i> a comprender.	
Neurociencia.	
Origen del pensamiento.	
Neuronas matemáticas.	
El otro extremo, y los mapas de Borges.	
2. <i>Complejidad y su dinámica</i>	37
Cambios naturales de <i>fase</i> .	
Eficacia de lo crítico.	
Anormalidades muy naturales.	
Potencias y exponentes críticos.	
¡Avalancha!	
Universalidad.	
Ruidos de colores.	
Violando el determinismo.	
Mapas matemáticos.	
Coeficientes de Lyapunov.	
Irregularidades.	
Escala dinámica.	
No es lineal ni está en equilibrio.	
Ecuación del movimiento.	
La complejidad emergente.	
Complejo <i>versus</i> complicado.	
3. <i>Relaciones estructuradas</i>	81
La malla que liga.	
Dando forma a la relación.	
Proximidad.	
Cómo tender redes.	
Un cableado preferencial más “justo”.	
La malla se hace crítica.	
Organizando la maraña.	
Mezclar es bueno.	

Entropía de la red. <i>Conectoma</i> , estructura y tal.	
4. Evidencia crítica	109
<i>Terremotos</i> cerebrales. Ventajas de tener un cerebro crítico. Optimizando en un entorno óptimo. Correlaciones y dinámicas mentales.	
5. Un cerebro <i>in silico</i>	125
El recuerdo, camino hacia el talento. Ruido biológico y fluctuaciones sinápticas. La irregularidad nos hace inteligentes. Un buen uso de las sinapsis. Sobre las buenas relaciones. Estructurando la malla.	
6. <i>Bestiario</i> mental	177
La excitación se transmite. Resonancias. Cambios que animan la mente. Hay asimetrías. Y brotó la inteligencia. Ego y otras memorias. Estructura para recordar mejor. De cómo nos hacemos inteligentes a la vez que críticos. Estamos en el mismo borde ¿de qué? Hormigas con talento. Robots inteligentes. Límites al talento social. Psicología virtual.	
7. Penetrando la mente	227
Estados de atención. El modelo es perturbado. ¡Cuidemos las sinapsis! Conciencia, y el <i>dolce far niente</i> . Condiciones mentales y premonición.	
La bibliografía	249 - 260



EUG, Editorial de la
Universidad de Granada,
Diciembre 2017

http://editorial.ugr.es/static/Emanagement/*/detalle_libro/la-mente-es-critica

<http://sl.ugr.es/09Qk> (editorial)

<https://canal.ugr.es/noticia/ugr-publica-la-mente-es-critica/>

www.amazon.es (pinchar para tener la dirección completa, o buscar 'amazon mente critica marro chialvo')

Prólogo

La naturaleza es sabia y sobria. No imaginamos que pudiera realizar mejor sus muchísimas y diversas tareas ni que fuera capaz de hacerlo de modo más económico. Y estas dos facetas conforman su esencia. La primera es tan obvia que se ha acuñado el dicho “la naturaleza es sabia” revelando así cómo los humanos han ido advirtiendo método en el devenir de las cosas. Un atento examen pronto nos confirma que esta antigua y popular afirmación es ciertamente perspicaz. Pero... ¿qué hay tras ella? ¿Cómo puede algo tan extenso y diverso, a veces inanimado e irracional, mostrárenos *sabio* —esto es, conducirse de modo oportuno y competente— hasta el punto de ser éste uno de sus rasgos fundamentales?

Menos notoria es la segunda propiedad pero la naturaleza —aunque el poeta pueda verla de otro modo— es sobria en sus manifestaciones, como si escatimara sus formas de expresarse. Actúa con moderación y economía cuando se nos muestra. No hay tantos fenómenos diferentes como uno podría pensar, advertía Richard Feynman —premio Nobel e importante pensador en la segunda mitad del siglo pasado— descubriéndonos una especie de *principio de parsimonia* que conviene atender. Es claro que tiene su origen en la validez universal de las leyes fundamentales de la naturaleza —esto es, “las mecánicas” incluyendo el electromagnetismo en esta generalizadora denominación— pues, al tratarse de leyes imperativas e idénticas por doquier, propician economía fenomenológica. Pero hay algo más y no menos importante: nada en la naturaleza estimula excesos barrocos ni intenta evitar la relativa sencillez de esas leyes —una sencillez que, de hecho, estamos siendo capaces de inferir desde un minúsculo entorno perdido en una enorme galaxia que solo es una más entre muchos miles de millones de ellas.

La parsimonia que aquí interesa notar se hace constantemente evidente al estudiarlo. Es el caso cuando, al tratar de comprender flujos diversos, sean

de materia, energía o información —como cuando analizamos con cuidado huracanes, tornados, supernovas y galaxias, o detalles del fuego en antorchas y de fluidos en escapes, o bien las grandes reacciones espontáneas en redes sociales, la actividad de colonias de bacterias y cultivos de neuronas o el campo gravitatorio en agujeros negros—, llega a descubrir en todos estos casos turbulencias con formas geométricas próximas a espirales logarítmicas, por ejemplo. Esto seguramente es indicio de que, a pesar de mostrarse aparentemente distantes, todos esos fenómenos son susceptibles de una misma descripción matemática. Sumándose a esto, la física también demuestra, y lo ha hecho de modo preciso, semejanza matemática entre manifestaciones dispares, todas familiares y muy frecuentes en la naturaleza, que llamamos *cambios de fase* y recibirán merecida atención en este libro.

Una importante consecuencia de esta parsimonia, obviamente generadora de universalidad, es la estolidez de las barreras en ciencia. Es cierto que la amplitud y la profundidad del conocimiento actual demandan especialización, pero el científico sabe que ha de estar siempre atento a las fronteras de su campo y a lo que ocurre más allá. Ha de perfeccionar, pero también romper eventualmente los caminos de mejora —la lámpara LED no es evolución de la bombilla incandescente ni ésta surgió como reforma del candil de aceite. La actividad intelectual en las fronteras y los avances en otros campos del conocimiento son esencial inspiración para conseguir esos necesarios saltos. Es por ello que —siguiendo numerosas recomendaciones, como las celebradas del biólogo D'Arcy Thompson, el físico Erwin Schrödinger y el fisiólogo Arthur Solomon— este libro quiere ser, entre otras cosas, canto a la libertad para transgredir falsas fronteras. La parsimonia consigue de este modo, aparte de propiciar una útil y necesaria colaboración entre científicos, favorecer y casi forzar el uso de analogías en ciencia. Esta estrategia —que ya nos enseñó a manejar Leonardo da Vinci con maestría— ayudará en este libro a encontrar respuesta a esas preguntas que antes nos hicimos. La neurociencia y su compañera la neurobiología son esencialmente empíricas y, para llevarnos al conocimiento completo que interesa, han de progresar mediante analogías. El que la compenetración entre un biólogo, James D. Watson, y un físico, Francis Crick, consiguiera un

enorme progreso del conocimiento al descubrir en 1953 la estructura molecular del ADN, debería de inspirarnos al tratar los misterios de la mente. Los datos que empiezan a ser disponibles requieren de estudios teóricos globales y profundos, algo que hoy no puede imaginarse si no es basándonos en analogías con fenómenos que ya se conocen bien en física. Este análisis ha de dar coherencia —que involucrará matemáticas, incluso avanzadas, pues no hay razón para suponer una estructura menos sofisticada en este sentido de la biología que de la física— a todas esas observaciones y nos indicará qué más hemos de buscar en el laboratorio.

Una vez identificadas *sabiduría* y *economía* como dos facetas esenciales de la naturaleza, ha de hablarse de la tercera, *complejidad*, que es una cualidad científica consecuencia de cooperación que condiciona, incluso determina las otras dos. Esta circunstancia se hace explícita, por ejemplo, al analizar el papel de la neurona en relación con las operaciones mentales. Descubierta por Santiago Ramón y Cajal hace más de un siglo, hoy la reconocemos como una sofisticada célula que responde a estímulos y transmite información, despertando así gran interés en química, fisiología, biología y física, y ha originado por ello una abundante literatura. De hecho, ha dado en llamarse *neurociencia* el estudio del sistema nervioso y la neurona es *Prima Donna* de las óperas sobre el tema, que llegan a dedicar sus dos “actos” a resaltar sus excelencias. Una reflexión pronto indica, sin embargo, que es, digamos, “algo tonta”. Se muestra como un elemento demasiado sencillo, con una capacidad de procesamiento muy limitada para la responsabilidad que le atribuimos. Ha surgido así la incógnita principal. ¿Cómo se las arreglan elementos tan simples para dar lugar a funciones tan complicadas como las que caracterizan nuestro cerebro?

Comprender este misterio —extensible *mutatis mutandis* a otros muchos campos del conocimiento— requiere un tercer acto, que no atañe a la magia ni al espíritu, sino a la ciencia. De hecho, es la parte más importante del drama que, sin embargo, en los tratados usuales del cerebro sólo dura un instante, a veces oscuros comentarios mientras cae el telón. Los aplausos son así empañados por las quejas de descontentos que reclaman detalles. Son los que quieren saber cómo surge la mente, que es mucho más que

estudiar la neurona. Han notado que falta comprender el mecanismo que hace emerger inteligencia de una colección de *tontas* neuronas, un conjunto que muestra una conducta no solo cuantitativamente mayor sino cualitativamente distinta a una suma de tonterías individuales.

La clave que resuelve el aparente misterio es ya percibida por el niño cuando adopta tempranamente actitudes de cooperación social. Descubre —suele ser una primera lección fundamental— que la concurrencia de otros es inesperadamente capaz de incrementar sus posibilidades de diversión y le hace más fuerte. Luego notamos que los seres vivos, por elementales que sean, practican la cooperación para optimizar el logro de alimentos y el éxito de sus apareamientos o para defenderse de perturbaciones y burlar a sus depredadores. Nuestra preparación para la vida profesional quizá incluya lecciones de trabajo en equipo, y el entorno social y político nos irá eventualmente recordando que “la unión hace la fuerza” o que “juntos somos más”.

Estas circunstancias revelan que pasan cosas en el grupo que no ocurren cuando está disperso. Es confirmación de la idea aristotélica de que, en situaciones reales, el todo es mucho más que la suma de sus partes. Y no es ésta una idea aventurada ni estéril. La física tiene ejemplos de ello y, lo que es aquí importante, los ha estudiado en el siglo XX hasta desarrollar un potente esquema teórico. Es una estrategia —basada en la física estadística y en la teoría de fenómenos cooperativos— que ya ha permitido comprender con precisión consecuencias de aquella idea en un cierto rango de aplicación. La condición *sine qua non* para poder trasladar con éxito este esquema a otros campos del conocimiento, traspasando así las fronteras de la física, es disponer allí de suficientes datos de buena calidad. Esta circunstancia ha empezado a darse en neurociencia. La evolución de la encefalografía, las resonancias magnéticas y la tomografía por emisión de positrones —que ya producen imágenes estáticas y dinámicas bastante detalladas de la estructura y funciones cerebrales— y la sofisticada implantación de diminutos electrodos y sondas —capaces de detectar y medir débiles flujos y pulsos eléctricos generados en áreas localizadas que idealmente incluyen una o pocas células nerviosas— hacen hoy de este

campo un “El Dorado” para la investigación. Se ha abierto de este modo a físicos y matemáticos un atractivo panorama, donde ya estaban cómodos biólogos y médicos, que ahora invita a una nueva filosofía. La observación ha relegado a vieja ficción aquella largamente alimentada —pero inexplicada— “dualidad mente-cerebro”. Ha sido vencida la falta de información que llevó a esas doctrinas, igual que los organismos vivos ya no son vistos como una especie de materia mágica dominada por supuestas “fuerzas vitales”. El estudio de lesiones cerebrales y del efecto de drogas psicoactivas, por ejemplo, ya relaciona sin duda los procesos cognitivos con acciones comprensibles en un sustrato material. La mente ha dejado de ser objeto de misterio. La respuesta a muchas de las preguntas importantes es conocida, o bien puede imaginarse y será pronto homologada por nuevos experimentos.

En este reciente abrir de puertas, se ha ido confirmando que la mente ha de comprenderse desde conceptos básicos —masa, espacio, fuerza y tiempo, junto con otros algo menos familiares que nos proponemos describir a lo largo de este ensayo— y, lo que también es muy relevante, la neurociencia se ha ido topando con nuevas ideas que en ese momento estaban fertilizando y permeando el pensamiento científico. Aquí, en un reino que no ha sufrido una revolución conceptual como la de la mecánica cuántica, de modo que seguía sobrevalorando el determinismo, ha llegado a hacerse claro que entender bien la relación observada entre función y morfología requiere penetrar en el mundo de las irregularidades dominado por el concepto de probabilidad. En definitiva, el estudio de la mente ha de seguir la senda de Demócrito, Epicuro y Monod donde las leyes del azar, complementando en un sentido informativo a las mecánicas, juegan un papel aparentemente discreto pero esencial.

Usando un lenguaje llano, evitando tecnicismos y matemáticas más allá del álgebra sencilla, este libro ha sido preparado para estudiosos y curiosos desde nuestras formaciones respectivas en física y medicina, y quiere reflejar nuevos avances en la comprensión de la mente que se siguen de los hechos que venimos mencionando. Centramos la atención en aspectos que, desde aquella nueva perspectiva científica, retratando una relación íntima

entre campos de la ciencia que hoy es básica para comprender, profundizan en preguntas razonables que ya nos podemos hacer acerca de la mente. Hay veces en las que somos capaces de presentar respuestas a esas cuestiones o, al menos, indicar dónde comienza un camino fiable hacia ellas, mientras que otras veces hemos de limitarnos a mencionar y evaluar conjeturas. En todo caso, la exposición que presentamos es científica y encaminada a ser útil no solo para el novicio sino también para el iniciado. Conviene además señalar desde un principio que nuestros objetivos y planteamientos nos han obligado a soslayar o pasar rápidamente por ciertas partes del conocimiento y profundizar solo en otras que ya proporcionan en este momento la imagen que nos parece más completa e interesante desde nuestra —por supuesto, limitada— perspectiva. Este proyecto es fruto maduro del convencimiento de que la asociación entre un físico y un fisiólogo con experiencias a veces paralelas podría proporcionar las bases para un escenario útil y poco usual.

La estrategia de este libro para abordar el “tercer acto”, esto es, las consecuencias de la cooperación entre muchas neuronas y sus respectivos entornos, consiste en, aprovechándonos de esa riqueza de datos disponibles, basarnos en la consideración de modelos. Pero no intentamos llegar a mostrar un modelo único del cerebro y sus funciones —un largo camino al que otros están dedicando gran esfuerzo con previsible importantes consecuencias en la prevención de enfermedades y el desarrollo de nuevas tecnologías— sino que aquí pormenorizamos y buscamos respuestas sencillas a cuestiones fundamentales. Nos proponemos ir explorando modelos parciales, a veces tan solo cualitativos, especie de metáforas de la ciencia que, motivadas por recientes observaciones en neurobiología, permiten ir comprendiendo aspectos de la realidad que interesa.

El primer capítulo de este ensayo estudia la neurona, dejando claro su interés a nivel celular, y también que poco podría hacer uno solo de estos elementos, aun con todos sus accesorios, si estuviera aislado. Resulta por tanto natural abordar las consecuencias de una supuesta cooperación entre neuronas, lo que tiene un bonus: dado que ello involucra conceptos básicos, hemos aprovechado para agruparlos y describirlos con cierto detalle. Esto

motiva los dos siguientes capítulos en este ensayo y, en ocasiones, comentarios insertados en capítulos más adelante cuando viene a cuento.

En el capítulo segundo se describen herramientas que la física viene aportando para comprender los fenómenos colectivos. Mediante la consideración de ejemplos, damos así sustento a las nociones de orden y desorden, ruido, cambio de fase y criticidad, emergencia, dinámica caótica... y, por encima de todos ellos, casi como un compendio, aparece *complejidad*. Son conceptos que hoy jalonan todos los campos del conocimiento y, en particular, resultan imprescindibles para comprender los misterios de la mente humana, una tarea que hoy ha de abordarse desde la perspectiva de los fenómenos cooperativos. Llegamos de este modo a que la complejidad con la que aquí nos encontramos, una que vamos a ver emerger naturalmente de la cooperación entre muchas neuronas y sus entornos, resulta manifestarse como una extraordinaria condición crítica cuyo mantenimiento —iremos notando al comparar con otras situaciones naturales— podría constituir una fuerza esencial en el proceso evolutivo de selección natural.

Un instrumento clave en la comprensión de conjuntos cuyos elementos —sean neuronas u otros— interaccionan resulta ser el de malla, por lo que dedicamos el capítulo tercero a repasar estudios recientes sobre redes que permiten describir la estructura de relaciones físicas y/o funcionales. Esto se complementa estudiando aquí modelos de crecimiento y optimización de redes, tratando de llegar a descifrar procesos dinámicos durante la evolución biológica que podrían haber contribuido a diseñar la forma del cerebro humano actual.

Un lector familiarizado con biología debiera de poder omitir el primer capítulo, mientras que el segundo y la primera parte del tercero pueden ser innecesarios para los que tengan familiaridad con las nociones de física mencionadas. Es también notable que muchos, casi todos nuestros lectores preferirán prescindir por completo de los “cuadros” que a lo largo del libro incluimos con explicaciones técnicas —aunque algunos otros seguramente agradecerán estas disquisiciones como un complemento rápido y útil que les evita ir a consultar otros textos.

La evidencia empírica que aquí más interesa empieza a desgranarse en el capítulo cuarto, donde presentamos una variedad de experimentos que han detectado criticidad y fenómenos análogos a las transiciones entre fases de la física, esto es, cambios cualitativos referidos a la dinámica cerebral —y no entre estados de la materia como en la física tradicional. Comenzamos analizando escalas relativamente pequeñas, digamos, de miles a cientos de miles de neuronas, para llegar a las escalas mayores donde se considera todo el cerebro o una parte significativa de él. La interpretación de los experimentos nos lleva a discutir luego con detalle cómo la complejidad del cerebro se puede explorar desde la perspectiva de los conceptos presentados en los capítulos segundo y tercero.

Aceptando este reto, en el capítulo quinto introducimos y discutimos modelos matemáticos computacionales de algunos procesos relevantes, lo que es crucial no solo para confirmar las observaciones en el capítulo anterior sino también para interpretarlas con respaldo matemático y poder proponer extensiones de aquellos experimentos. En este capítulo también exploramos los conceptos de memoria y de inteligencia. El capítulo sexto es una especie de *bestiario*, donde tratamos de comprender la memoria a corto plazo y repasamos fenomenología que cimienta la inteligencia, incluyendo la incidencia del comportamiento crítico en este contexto. También se aborda aquí el concepto de inteligencia social, pues ayuda a comprender circunstancias y procesos mentales.

Nos ha parecido ineludible completar este relato con un capítulo séptimo, donde seguimos el mismo tono y estrategia pero adentrándonos ahora por espacios fascinantes cuyo estudio es todavía incipiente. Esta exploración confirma cómo las herramientas introducidas a lo largo del libro pueden eventualmente permitir “leer la mente” y estimar cuantitativamente la dinámica cerebral en distintas circunstancias, incluyendo casos en los que el sujeto está despierto o dormido, es consciente o inconsciente, se encuentra anestesiado, o bien bajo los efectos de agentes psicodélicos,... Concluimos notando que la imagen reflejada a lo largo de este ensayo sugiere nuevas direcciones hacia las que dirigir esfuerzos que pronto pueden permitir llegar a formular una completa y útil, digamos, “teoría del cerebro”.

Y es un placer cerrar este prólogo haciendo explícito nuestro profundo agradecimiento a compañeros de viaje, que a veces nos abrieron camino y otras lo abonaron con su colaboración y valiosísimas discusiones, entre los que destacamos a Per Bak, Álvaro Corral, Jesús M. Cortés, Lucilla de Arcangelis, Sebastiano de Franciscis, Víctor Eguiluz, Javier Galadí, Pedro L. Garrido, Samuel Johnson, Malvin H. Kalos, Herbert J. Kappen, Joel L. Lebowitz, Jorge F. Mejías, Ana P. Millán, Miguel A. Muñoz, Oreste Piro, Dietmar Plenz, Enzo Tagliazucchi y, de modo importante en los últimos años, Joaquín J. Torres.

En Buenos Aires y La Herradura de Granada, comenzando la primavera 2017

