

El misterio de las redes de neuronas

Una perspectiva desde 2008

Por Eduardo Mizraji (*)

En el año 1997, la iniciativa ejemplar de un grupo de estudiantes de la Facultad de Ciencias los condujo a editar la revista "Chronos". Por la generosa invitación de los editores, escribí un texto sobre la manera cómo los investigadores nos situábamos frente al apasionante y difícil problema de comprender la emergencia de actividades mentales en las complejas redes neuronales que conforman el cerebro humano. Hoy –pasados más de diez años– hay avances interesantes, pero, quizá, el misterio de la existencia de la mente humana subsista tan hondo como hace una década. En la primera parte de esta nota, se reproduce casi incambiado el texto publicado en "Chronos". En la segunda parte, se comentan dos avances novedosos que podrían ayudar a cercar este elusivo misterio.

El misterio en 1997

Para las personas que tienen vocación por la ciencia pocas cosas hay tan irresistibles como un misterio.

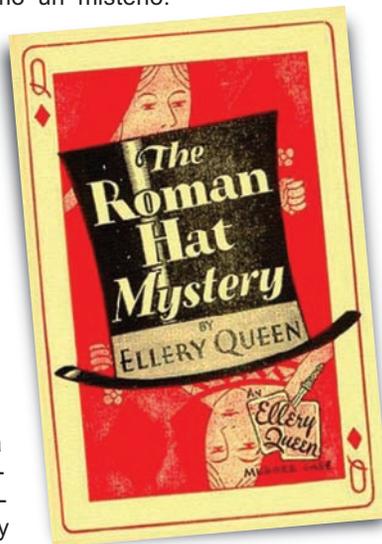
Éste enciende su curiosidad y, si la persona está entrenada, desencadena un complicado proceso exploratorio. Pero lo esencial de este proceso exploratorio excede a la ciencia y ha sido muchas veces magníficamente descrito.

Algunos "misterios" famosos son: El Misterio del Sombrero de Copa, El Misterio de la Naranja China, El Misterio de la Cruz Egipcia, El Misterio de los Hermanos Siameses. Son estos los títulos de las primeras novelas de Ellery Queen. En cada una de sus aventuras, el brillante y extravagante Ellery combate contra algún misterio complicado y dramático, que en general involucra un asesinato. Este misterio derrota y desespera al investigador, hasta que llega un momento crítico de la novela. En este momento particular, tanto Ellery como el lector pasan a estar en posesión de todos los datos del problema. Entonces, a través

de una cadena de razonamientos, sostenidos tanto por la lógica como por el encendido entusiasmo del detective, ambos son capaces de descubrir la identidad del asesino.

Toda buena novela policial es una fiel metáfora de lo que ocurre en la ciencia. Hay en ambas misterios capaces de apasionar, de generar en el investigador una conmoción emotiva. Y hay también la esperanza, así sea remota, de poder encontrar una solución. Este es, entonces, el ingrediente clave: un misterio apasionante y potencialmente soluble. Además, en ambos casos el investigador se enfrenta con un escenario incompleto: el misterio es enunciable (¿quién mató al Dr. Xavier?), pero faltan datos. Entonces el investigador busca información, interroga, explora el territorio. El proceso de investigación consiste en esta adquisición de datos. En las novelas, hacia el final,

éstos terminan siendo suficientes para el detective y él resuelve el caso. Y también en la ciencia, cuando se conjugan varias circunstancias felices, los datos y la inteligencia terminan resolviendo los misterios.



Tapa de la primera novela de Ellery Queen, 'El Misterio del Sombrero de Copa'.

Ellery Queen es a la vez el nombre del protagonista de las novelas y el pseudónimo usado por los dos primos que, asociados, oficiaban de autor.

Mente humana

Uno de los más apasionantes misterios es la existencia de la mente humana. Este enigma, que tantas profundas reflexiones ha suscitado en los filósofos del pasado, se ha agudizado en tiempos recientes. Hoy en día, gracias al conocimiento que se dispone de la anatomía y la fisiología del sistema nervioso, se ha adquirido conciencia de la dimensión del enigma.

Pensando en las cosas que definen el mundo creado por los humanos, la agricultura y las tecnologías alimentarias, la medicina, las ciudades, la información almacenada en las bibliotecas, la música, las construcciones matemáticas, los filmes de Orson Welles, son la consecuencia de la existencia de una lámina gris, de algunos milímetros, que tapiza un órgano alojado en el interior del cráneo de cada persona. El cerebro es el creador y el "decodificador" de estas realidades humanas. Sin él, sin sus códigos, nada de esto hubiese sido creado y nada tendría sentido. ¿Qué sería un concierto de Bach o un paisaje de Monet sin humanos que los percibiesen? Toda esta gigantesca construcción que nuestra especie ha creado se apoya, entonces, en una delgada lámina de células nerviosas.

Los investigadores de hace un siglo, o dos, intuían algo hondo y grandioso en la existencia de la mente, pero sus conocimientos de anatomía y fisiología eran todavía insuficientes como para permitirles evaluar racionalmente la complejísima dimensión del problema. Sin embargo, la extraordinaria inteligencia de algunos de estos antepasados les permitió construir poderosas teorías funcionales de la mente, de plena vigencia aún en estos días. "Teorías funcionales" quiere decir que eran teorías que analizaban la función de la mente, sus habilidades lógicas, la estructura de los lenguajes, la generación de conceptos, sin intentar conocer sus bases físicas.

Neuronas y sinapsis

La imagen actual muestra a la corteza cerebral como una extensa trama de redes de neuronas, una complicada red de redes. En especial en las últimas décadas, se ha logrado obtener una pormenorizada información sobre el substrato material de las actividades mentales; se sabe bastante sobre el órgano y las células que sustentan nuestra actividad psíquica. Se conocen las propiedades de las zonas de comunicación entre neuronas, zonas llamadas "sinapsis", donde seguramente ocurren muchas cosas importantes para la vida mental.

Las neuronas pueden comunicarse entre ellas utilizando códigos de señales electroquímicas, generadas y transportadas por sus membranas celulares. También pueden excitar o inhibir la actividad de aquellas neuronas con las que contactan, lo que está vinculado con clases especiales de moléculas, llamadas neurotransmisores, que las células nerviosas pueden liberar en sus sinapsis. Muchas más cosas se saben, y éstas están registradas en la abundante bibliografía científica sobre neurociencias que fluye constantemente. Sin embargo, esta abundancia de información experimental no resuelve el misterio que rodea a la aparición de actividades psíquicas, aunque sí lo define con más precisión.

Quizá hoy en día el misterio tiene este enunciado: ¿Cómo explicar, a partir del hecho de que las redes nerviosas están constituidas por células (que funcionan en completo acuerdo con las leyes de la fisicoquímica) la aparición de las actividades mentales? La neurona es extraordinariamente compleja, pero de hecho toda célula lo es. Ahora bien, la neurona además de ser una célula, es una unidad de procesamiento de información. Así, una clase importante de neurona puede actuar como un modulador de frecuencia, que transforma las frecuencias de sus señales de entrada en una frecuencia de salida. Se dice que estas neuronas operan mediante un código de frecuencias. Otra clase de neurona puede usar otro tipo de código. Entonces la situación es esta: unidades con capacidades computacionales bastante simples parecen ser la base de la generación de actividades mentales muy complejas.

Herramientas matemáticas

La teoría de las redes neuronales busca explicar el surgimiento de actividades cognitivas (o computacionales) complejas a partir de la interacción de muchas unidades simples. Aquí hay un asunto clave: la actividad mental (o cognitiva, o computacional) que se procura representar se asume resultado de la acción colectiva de miles de neuronas. Pero el análisis del comportamiento colectivo de muchos miles de unidades simples implica dificultades formidables.

Afortunadamente, los investigadores que enfrentaron estos problemas entre 1940 y 1970 tuvieron a su disposición poderosos instrumentos matemáticos que venían siendo desarrollados desde mediados del siglo XIX. En particular, uno de estos instrumentos, el álgebra matri-



cial, permitió encontrar una representación matemática poderosa para las memorias asociativas.

Esta representación compartía varias propiedades con las memorias biológicas. Por ejemplo, la información se almacenaba de modo distribuido, de forma tal que el deterioro parcial del soporte físico esto es, la destrucción de algunas sinapsis o incluso neuronas, no implicaba la pérdida de la información. Por otra parte, estas memorias eran capaces de reconstruir una asociación a partir de información parcial. Además, exhibían una especie de construc-

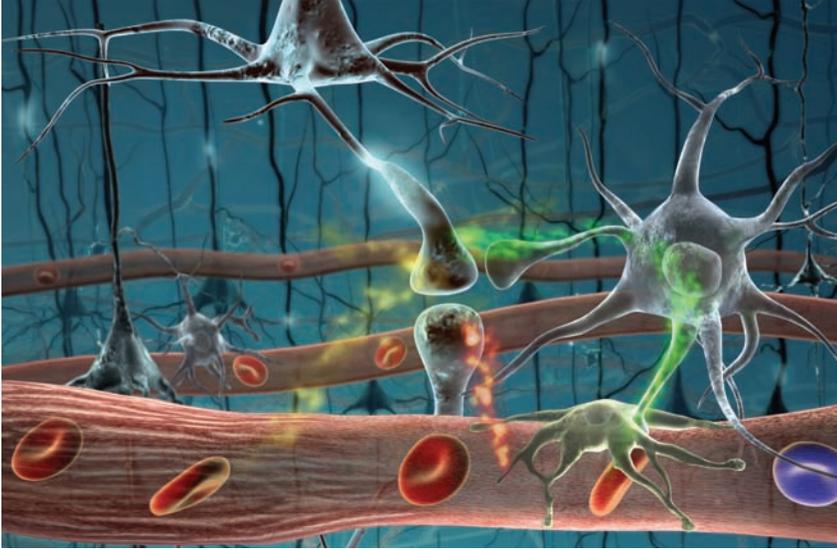


Imagen del artista Kim Hager y el neurobiólogo Neal Prakash, UCLA.

ción de conceptos mediante el colapso de la variedad de la información en unos pocos prototipos. Por ejemplo, el contacto con algunos tigres agresivos, lleva a los humanos a sustituir los detalles de sus experiencias con esos varios tigres, por un único tigre prototípico, guardado en sus memorias mediante unos pocos rasgos característicos (sus rayas, su sigilo, sus ojos, su ferocidad).

La contrapartida biológica de estas memorias matemáticas era que la información plausiblemente podía estar almacenada en las sinapsis. En los modelos, estas sinapsis quedaban condensadamente descritas por parámetros numéricos.

Estos hallazgos activaron intensamente la búsqueda de algoritmos, que son listas de instrucciones bien definidas, donde se especifica una sucesión de operaciones necesarias para resolver un problema, de aprendizaje para memorias artificiales. Algunos de los promisorios resultados iniciales estimularon fuertemente el interés de los ingenieros en computación en procedimientos de aprendizaje de inspiración biológica. De hecho estas investigaciones sobre las memorias mostraron cómo era posible establecer pronósticos empíricos para situaciones muy complejas (por ejemplo, predicciones meteorológicas) basándose en bases de datos almacenadas en memorias asociativas. Estas aplicaciones prácticas son áreas muy activas de la investigación tecnológica, y en ellas convergen los esfuerzos de ingenieros y biólogos.

¿Es posible actualmente resolver el misterio?

¿Se poseen ya todos los datos del problema? Los lectores de las novelas de Ellery Queen conocen las desazones del protagonista; la investigación suele tener un progreso sostenido, pero su ánimo sufre altibajos. En las investigaciones de Ellery suele haber momentos de depresión y momentos de exaltación: estos últimos ocurren en especial después de la aparición de algún indicio revelador. Los modelos de redes neuronales se parecen a estos indicios reveladores. A partir de estos modelos, y

ante algunas de sus extraordinarias performances, surge el sentimiento de que estamos cerca de la meta. Sin embargo es casi seguro que falta mucho, y que el gran entusiasmo actual sobre las redes neuronales es algo muy parecido a la exaltación transitoria de un detective de ficción frente a los nuevos indicios.

Una concepción plausible sobre la naturaleza de la actividad mental es la siguiente. Presumiblemente las memorias distribuidas constituyen módulos con capacidades de procesamiento de información muy superiores a las de las neuronas que las sustentan. Estos módulos pueden tener cierta especificidad temática ligada al lugar donde se encuentren (por ejemplo, módulos de memorias

visuales, u olfativas). Una actividad cognitiva puede ser el resultado de una complicada interacción dinámica entre muchos de estos módulos. La base de la actividad mental quizá sea la dinámica de esta red de módulos.

Existen algunas aproximaciones muy preliminares al estudio de estas dinámicas entre módulos. Pero el misterio de la mente requiere una comprensión básica de fenómenos tan enigmáticos como la actividad consciente, la generación de los lenguajes articulados, las capacidades de solución de problemas, los distintos estratos de construcción de conceptos, o los métodos de razonamiento. Basta reflexionar sobre este catálogo parcial para convencerse de que este misterio quizá esté en una etapa intermedia en su ruta hacia la solución. Y que, tal como le suele ocurrir a Ellery, a nuestras actuales esperanzas sucedan también algunas desilusiones y nuevas estimulantes sorpresas.

El misterio en 2008

A partir de 1997, ocurrieron avances en las ciencias médicas y en las ciencias de la computación que reabrieron vínculos que la teoría de las redes neuronales ya poseía desde su nacimiento, durante la década de 1940. En sus comienzos, y por la influencia de neurólogos y psiquiatras como Warren McCulloch y William Ross Ashby, los modelos de redes neuronales se enfocaron como un potencial instrumento con el que abarcar científicamente las inextricables complejidades de las enfermedades mentales.

Naturalmente este objetivo pasaba por comprender a la vez las notables propiedades de la mente humana y resolver en parte el misterio de su existencia. Durante esos tiempos pioneros, los modelos neurales desarrollados bajo la inspiración de los problemas de la neuro-psiquiatría produjeron resultados que, al ser refinados por matemáticos profesionales como John von Neumann y Norbert Wiener, inspiraron procedimientos computacionales con fuerte impacto tecnológico.

Enfermedades psiquiátricas

En el momento actual, muchas décadas después de creados los modelos fundacionales, varias afecciones psiquiátricas graves comienzan a ser investigadas usando modelos de redes neuronales. Señalamos en particular, la representación por medio de modelos neurales de los trastornos severos de la enfermedad de Alzheimer, de diversos aspectos de los síndromes depresivos, y de las alucinaciones producidas por diferentes formas de esquizofrenia.

Ningún modelo neural ha pretendido abarcar completamente una enfermedad psiquiátrica grave. En general, para las enfermedades investigadas se ha elegido una parcela de la sintomatología susceptible de ser representada por redes de neuronas, cuyas propiedades esquemáticamente reproduzcan lo que se sabe sobre la biología de la afección psiquiátrica estudiada. Hoy en día, y especialmente por la información obtenida a partir de imágenes funcionales del cerebro (mediante técnicas como la tomografía por emisión de positrones, o la resonancia magnética funcional), se está logrando localizar algunos de los sistemas neurales asociados a los principales signos y síntomas de los trastornos psiquiátricos mayores. La filosofía de trabajo es la siguiente:

- 1) Representar, mediante un modelo neural, el sistema responsable de una conducta que se altera durante la enfermedad (por ejemplo una memoria responsable de construcciones verbales o de evaluaciones afectivas)
- 2) Deteriorar esa red neural "matemática", de modo de reproducir *in numero* (esto es, mediante simulaciones computacionales) los síntomas en los que se enfoca el investigador;
- 3) Ensayar sobre la red neuronal deteriorada diversos procedimientos que simulan terapéuticas farmacológicas o conductuales.

Estos modelos de red neural tienen la virtud de poder integrar en su estructura la compleja diversidad de eventos moleculares, celulares, anatómicos, fisiológicos, farmacológicos y conductuales presentes en las redes neuronales reales. Cada uno de los niveles de organización relevantes está incluido en el modelo y su influencia en el desarrollo de un trastorno psiquiátrico es susceptible de ser investigada. Quizá aún nadie ha llevado a cabo con pleno éxito este ambicioso plan, pero en los últimos tiempos comienzan a aparecer esfuerzos sostenidos en esa dirección. Sin duda a estos esfuerzos contribuyen de modo decisivo los avances espectaculares de la neurobiología experimental, y el creciente alcance de la potencia de las computadoras y de los programas, accesible a los laboratorios de investigación.

Teoría de redes

Desde mediados de la década de 1990, la humanidad asiste al desarrollo vertiginoso de las redes de información. A la red física que es la Internet, se sumó (por la visión genial y generosa de Tim Berners-Lee) la invención de una red de datos, la World Wide Web (www). Tanto la Internet como la www han exhibido un aumento

extraordinario de complejidad, y este proceso motivó que investigadores procedentes de variados campos —en especial de la física— desarrollaran procedimientos y teorías para entender la evolución de estas redes tecnológicas complejas.

Esto produjo la consolidación de un área hoy día llamada "teoría de redes", en la que quedan abarcadas las mencionadas redes de información, pero también otras complejas redes en las que existen fuertes interrelaciones entre sus elementos. Así, este nuevo enfoque está siendo aplicado en dominios tan variados como la genética molecular, la bioquímica, la ecología, o la sociología. También está mostrando propiedades importantes e inesperadas de las redes neurales.

Este es un campo incipiente, prometedor y de evolución sumamente dinámica. Existe cierto paralelismo formal entre la red neuroanatómica y la Internet (ambas son redes físicas) por un lado, y las redes cognitivas instaladas en memorias biológicas y la www (ambas son redes de datos) por el otro. Este paralelismo sugiere la posibi-

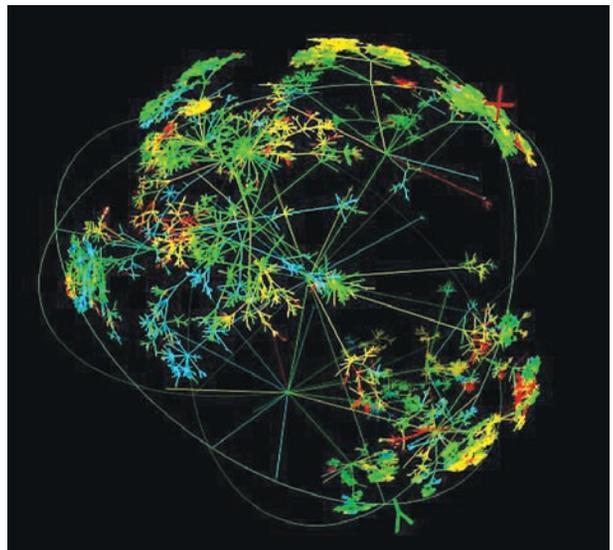


Imagen de un instante cualquiera de la actividad en el universo de Internet obtenida en el "San Diego Supercomputer Center" de la Universidad de California, San Diego.

lidad de una fertilización recíproca entre un abstracto tema científico como es el de los mecanismos con los que opera la memoria humana, y las avanzadas construcciones tecnológicas diseñadas para la extracción de información de las bases de datos artificiales.

Estas renovadas interacciones con las ciencias médicas y con las tecnologías de la información proponen importantes situaciones sobre las que contrastar y refinar la teoría de las redes neuronales. Aun se está lejos de la resolución del misterio, pero bien es posible imaginar que hoy Ellery estaría feliz, expectante, y explorando.

(*) El Dr. Eduardo Mizraji es Profesor Titular de Biofísica, Sección Biofísica, Facultad de Ciencias, Universidad de la República e Investigador Grado 5 del Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA). mizraj@fcien.edu.uy