



Artículo de revisión

## Comprendiendo el Código Neuronal: un análisis de cuatro perspectivas

Understanding the Neural Code: A Four-perspective Analysis

Norton Contreras Paredes<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica Cardenal Raúl Silva Henríquez, Santiago de Chile.

### Resumen

El objetivo de este artículo de revisión es dar a conocer diferentes perspectivas que han contribuido al estudio del Código Neuronal, un concepto que proviene de la Neurociencia y que explica el funcionamiento del cerebro a través de conexiones de neuronas. Se entregan cuatro ideas relacionadas con el análisis de este funcionamiento. En primer lugar, la propuesta de Convergencia Jerárquica, que ofrece una explicación asociada a un correlato neuronal específico para una conducta determinada. En segundo lugar, se aborda la idea del Código de Poblaciones, que explica el trabajo de un grupo de neuronas que representan un determinado estado. Posteriormente se expone la propuesta de Correlación Temporal, que plantea la presencia de poblaciones neuronales activas que se diferencian entre sí en base a patrones temporales de descarga para, finalmente, llegar al concepto de redes neuronales y sus diferentes modelos explicativos que han actuado como cimientos para el desarrollo de la Neurociencia moderna y que han sido desarrollados gracias a los aportes de la Biología, la Física, las Matemáticas, entre otras disciplinas, y que han generado las bases para la comprensión del funcionamiento del cerebro a través de neuronas interconectadas para lograr la expresión de los diferentes procesos cognitivos. El presente artículo pretende que el lector desarrolle una visión panorámica y general de cómo opera el flujo de la información que procesa el sistema nervioso central y el impacto que este fenómeno genera en el proceso de integración sensorial como parte de la emoción y la cognición en el cerebro humano.

**Palabras clave:** código neuronal, convergencia jerárquica, código de poblaciones, correlación temporal, red neuronal

### Abstract

The objective of this review article is to present different perspectives that have contributed to the study of the Neural Code, a concept that comes from Neuroscience and that explains the functioning of the brain through neuron connections. Four ideas related to the analysis of this functioning are presented. Firstly, the proposal of Hierarchical Convergence, which offers an explanation associated with a specific neuronal correlate for a specific behavior. Secondly, the idea of the Population Code is discussed, which explains the work of a group of neurons that represent a certain state. Subsequently, the proposal of Temporal Correlation is addressed, which proposes the presence of active neuronal populations that differentiate each other based on temporal discharge patterns, finally arriving at the concept of neural networks and their different explanatory models. The latter have acted as foundations for the development of modern Neuroscience and have been developed thanks to the contributions of Biology, Physics, Mathematics, among other disciplines, and have generated the basis for understanding the functioning of the brain through interconnected neurons to achieve the expression of the different cognitive processes. The paper aims to develop a panoramic and general view of how the flow of information processed by the central nervous system operates and the impact that this phenomenon generates in the process of sensory integration as part of emotion and cognition in the human brain.

**Keywords:** neural code, hierarchical convergence, population code, temporal correlation, neural network

### Introducción

El estudio del cerebro humano ha constituido uno de los desafíos científicos más importantes de la historia de la ciencia contemporánea. Muchos neurocientíficos a nivel mundial, y a lo largo de la historia, han destinado a diario sus esfuerzos para conocer los diferentes enigmas involucrados en la morfología y fisiología del sistema nervioso (Corsi, 1991).

El porqué de este interés pareciera ser bastante simple: la permanente búsqueda de información acerca de la relación entre la mente y el cerebro. Una relación que se sustenta en un punto de vista dualista, pero que también se ha ido perfilando a través de una perspectiva unificadora, como la planteada por Antonio Damasio, quien sostiene que mente y cerebro se encuentran unidos y poseen una relación indisoluble (Llacuna-Morera y Guardia-Olmos, 2015). Con esta relación se llega a proponer que el cerebro humano constituye un órgano de alta complejidad que controla la mente como una función operacional (Maldonado, 2007).

El sistema nervioso conforma una compleja red de estructuras que están perfectamente diseñadas para recibir estímulos que provienen del medio externo y también interno, como por ejemplo la información de orden propioceptivo. Este estímulo se procesa y finalmente se elabora una respuesta hacia el ambiente. Dicho esto, se pone de manifiesto que el sistema nervioso y, particularmente el cerebro, se encuentran en un estado de actividad permanente, que permite al individuo encontrarse en constante contacto con su entorno (Martínez Selva, 2017).

Para comenzar comprendiendo el concepto de Código Neuronal es necesario hacer referencia a otro concepto bastante relevante, conocido como *Correlato Neuronal*. En primer lugar, consideraremos, por ejemplo, el sistema visual, que se encuentra organizado para recibir estímulos tan variados como formas, colores y profundidad (esto último para otorgar tridimensionalidad a una imagen). Los estímulos son recibidos en la retina, una zona altamente especializada con células que generan una descarga dependiendo de la intensidad de la luz que contienen dichos estímulos. Luego de ello, la información sigue su curso de procesamiento, pasando hacia el tálamo para finalmente llegar a la corteza occipital (Quian, 2008). Con esto podríamos perfectamente

\* Correspondencia: Norton Contreras Paredes, Facultad de Educación - Escuela de Pedagogía en Educación Básica – Universidad Católica Cardenal Raúl Silva Henríquez. Dirección: General Jofré N°462, Santiago de Chile. Teléfono: +56 (2) 24601100. E- mail: [ncontrerasp@ucsh.cl](mailto:ncontrerasp@ucsh.cl)

preguntarnos cuál o cuáles elementos se encuentran detrás de todo este complejo fenómeno. Evidentemente la respuesta se encuentra en la neurona, la unidad básica del sistema nervioso a nivel morfológico y fisiológico. Toda la codificación de información que proviene del medio externo, sea ésta de cualquier índole, se encuentra a cargo de las neuronas (y sus diversos tipos, tales como las neuronas aferentes, eferentes e inter-neuronas), cuyo trabajo es capaz de generar un estado de actividad específico (Escobar, 2014).

Surge entonces el concepto de correlato neuronal, el cual puede definirse como una relación de tipo isomórfica entre la conducta y un estado de actividad neuronal. Este concepto no abarca únicamente al sistema visual, sino que involucra a todos los sistemas sensoriales que reciben estímulos determinados para que sean procesados por el sistema nervioso (Fell, 2004). Los esfuerzos de muchos neurocientíficos se han volcado incluso a trascender más allá de los conceptos convencionales que han marcado hitos importantes en la historia de la Neurociencia y se han dedicado a encontrar respuestas para la génesis y el sustrato neuronal de elementos tan complejos de definir como lo es la conciencia. Dichos esfuerzos han dado sus frutos paulatinamente, existiendo ya una definición del correlato neuronal de la conciencia, el cual se entiende como el conjunto de eventos que pueden ser observados en el cerebro humano al presentarse un estado mental consciente que es susceptible de ser observado y medido a través de diferentes técnicas de imagen cerebral (Zumalabe-Makirriain, 2016).

La importancia del estudio de la neurona, como entidad que logra trabajar en conjunto con otras, radica en la permanente búsqueda de información sobre la posible existencia de una dependencia funcional entre un estímulo y la descarga neuronal producida. En otras palabras, bajo esta mirada, se busca encontrar el Código Neural para un estímulo determinado por medio del examen de la relación entre un estímulo y una sensación (Romo, Salinas, Hernández, Zainos, Lemus, De Lafuente y Luna, 2002).

Existen múltiples propuestas que intentan explicar el funcionamiento de los grupos de neuronas en el cerebro humano. En el presente trabajo se exponen cuatro de estas propuestas, particularmente, aquellas que tratan sobre el funcionamiento de neuronas como modelo jerarquizado, funcionando en poblaciones y sirviéndose además de la sincronía temporal para el procesamiento sensorial, permitiendo conectarnos con el medio que nos rodea y entender, de un modo sencillo, cómo se produce la codificación neural en el cerebro. Posteriormente, se aborda el concepto de red neuronal como un paradigma que guía actualmente las diferentes líneas de investigación en Neurociencia. Todas estas propuestas, de uno u otro modo, exhiben un punto de convergencia: el hecho de que los procesos cerebrales (siendo objetivamente explicados por las diferentes ramas de la ciencia básica) logran generar estados subjetivos de sensación y pensamiento.

### Código Neuronal: orígenes de su estudio

Desde hace varias décadas, comenzando por los estudios de Santiago Ramón y Cajal, se consideraba a la neurona como la unidad morfológica y fisiológica básica del sistema nervioso, convirtiéndose esto en un verdadero axioma para la Neurociencia a lo largo de su historia (Palacios, Vergara, Liévano y Guerrero, 2015).

Los métodos de estudio del funcionamiento del cerebro humano se fueron complejizando a medida que los avances tecnológicos de las distintas épocas lo permitían. Dichos avances tecnológicos, en la época de Cajal, permitieron enunciar la *Doctrina de la Neurona*. Un concepto revolucionario para la época, que sostenía que el tejido cerebral estaba compuesto por células individuales llamadas neuronas y que no poseían relación alguna entre ellas. También postulaba que el impulso nervioso se transmitía de modo unidireccional, desde las dendritas al soma y posteriormente a las diferentes ramificaciones del axón (Yuste, 2015).

Comienza a surgir, de modo más específico, el concepto de *campo receptivo*, el cual sostiene la idea de que las neuronas sólo presentan sensibilidad a una proyección de entrada de información y se encuentran formados por estímulos que se encargan de iniciar o mantener la actividad neuronal (Maidana, 2013).

Las críticas a este modelo no tardaron en llegar debido a las limitaciones que esta propuesta poseía. En primer lugar, los nuevos métodos de registro electrofisiológico que paulatinamente fueron apareciendo, reportaban resultados diametralmente diferentes: que los conjuntos de neuronas son capaces de generar estados funcionales emergentes (Treviño y Gutiérrez, 2007).

Los científicos comenzaron a plantear el hecho de que equiparar la función neuronal con la respuesta a un estímulo podría constituir un fenómeno demasiado simplista. Con ello se intentó explicar además que, por

ejemplo, en las diferentes áreas sensoriales del cerebro, las neuronas no siempre son capaces de responder del mismo modo ante estímulos sensoriales similares entre sí (Yuste, 2015).

De este modo, comienzan a formularse más interrogantes al respecto. Una de esas interrogantes fue, precisamente, si las neuronas pueden interactuar asociadas entre ellas. Con ello se plantearon evidencias de tipo anatómico de que, efectivamente, el cerebro de los mamíferos exhibe una matriz de conectividad de tipo funcional, en el que las neuronas son capaces de recibir proyecciones y enviar las propias desde y hacia muchas otras neuronas (Braltenberg y Schüz, 1998).

Es necesario recalcar que las propuestas que se mencionarán a continuación constituyen una primera aproximación al conocimiento del Código Neuronal, por medio del entendimiento del funcionamiento del sistema nervioso a través de agrupaciones de neuronas, lo que posteriormente dará paso al establecimiento del concepto de red neuronal como nuevo paradigma de estudio de la relación entre el cerebro y la conducta.

## Un Análisis de Cuatro Perspectivas

### Perspectiva 1: convergencia jerárquica

El principal sustento de la Convergencia Jerárquica (*Hierarchical Convergence*) se basa en que el correlato neuronal se va construyendo a partir de una sucesión de complejidad en el sistema y toda la información que éste va recibiendo experimenta un fenómeno de convergencia en una zona específica que forma parte del resultado de la agrupación de elementos en el sistema. Uno de los aspectos más característicos es la especificidad de una agrupación de neuronas para una determinada conducta. Con ello surge un estado cognitivo como corolario de este modelo, el cual se basa en el cambio de la actividad neuronal en una neurona o lugar específico del sistema (Maldonado, 2007).

Un ejemplo claro de la repercusión que esta propuesta logró desarrollar lo constituye el análisis de las vías sensoriales, las cuales exhiben niveles sucesivos de convergencia, especialmente en mamíferos. En ese sentido, las investigaciones precursoras de lo que hoy se conoce en los seres humanos, adquieren capital importancia. Puntualmente, el trabajo realizado por Van Hoesen, Pandya y Butters (1972) significó un aporte sustantivo a la forma de entender la organización jerárquica de las agrupaciones de neuronas en el cerebro, visualizando las diferentes aferencias que recibía la corteza entorrinal del hipocampo. En la vía auditiva y visual, por ejemplo, existe una organización arquitectónica ordenada y jerárquica cuyo resultado funcional probable es una convergencia de señales sensoriales en ciertas áreas corticales (Man, Kaplan, Damasio y Damasio, 2013). Concretamente, en los seres humanos, se conoce un estudio realizado a través de la técnica de tensor de difusión (con el apoyo de un estudio de resonancia magnética), donde se demostró la convergencia de vías auditivas y visuales de tipo somatosensoriales de sustancia blanca en la corteza tóporo – parietal (Bonner, Peelle, Cook y Grossman, 2013).

En consecuencia, la importancia de la convergencia jerárquica en la organización neuronal del sistema nervioso central ofrece los siguientes puntos que son convenientes de considerar:

- I. Las vías sensoriales, especialmente, exhiben niveles sucesivos de convergencia, comenzando, por ejemplo, en una zona sensorial primaria, pasando por una corteza de asociación secundaria más específica y una corteza de asociación multisensorial para finalmente culminar en zona de máxima integración como la corteza del lóbulo temporal medial y la corteza prefrontal lateral – medial, la que forma parte del resultado de la agrupación de elementos en el sistema neuronal (Man, Kaplan, Damasio y Damasio, 2013).
- II. Es posible, además, que la convergencia jerárquica también involucre niveles sucesivos de divergencia, en donde el flujo de información transcurre en sentido opuesto: desde zonas de máxima integración hacia zonas sensoriales primarias (Man, Kaplan, Damasio y Damasio, 2013).

Sin embargo, este modelo no se encuentra exento de ciertas objeciones importantes que deben ser consideradas al momento de su estudio:

- i. Considera un poder combinatorial bastante bajo dentro del sistema de trabajo, es decir, éste considera muy pocos elementos para su funcionamiento. Con ello se obtiene un número muy limitado de estados de actividad posibles (Maldonado, 2007) y su representación es de una capacidad muy limitada (Malsburg, 1985).

- ii. El sistema es muy poco robusto (Malsburg y Singer, 1988). No obstante, es capaz de continuar manteniendo el correlato neuronal (Maldonado, 2007).

En los siguientes párrafos se verá cómo esta propuesta se va complejizando para dar paso a representaciones mucho más elaboradas y que involucran mayor robustez en su modo de funcionamiento.

## Perspectiva 2: código de poblaciones

Lo planteado por el modelo de Código de Poblaciones (*Population Code*) se basa en que, si bien las neuronas pueden tener grados de especificidad, el correlato neuronal puede ser distribuido en la población de una red. Con ello la información asociada a este correlato se puede encontrar en un grupo de neuronas que representan un estado de actividad determinado (Ganmor, Segev y Schneidman, 2015). Es uno de los ejemplos más clásicos que logra aproximarse al concepto de red neuronal como tal.

Este modelo, al igual que el anterior, nos entrega un estado cognitivo que explica un patrón distribuido de actividad en diferentes unidades o estructuras neuronales, ya sea en un sistema pequeño o en todo el cerebro, con lo cual se explota mucho más su poder combinatorial, materializado en ensamblajes neuronales que se definen por su intensidad de descarga (Maldonado, 2007).

Uno de los experimentos más clásicos que grafica esta propuesta es el realizado en el año 1986 por Apostolos Georgopoulos y colaboradores. En él se planteaba la idea de que, si bien existen neuronas individuales que representan los movimientos del brazo de un primate en la corteza motora en una dirección particular, es determinante el trabajo de poblaciones de neuronas corticales motoras que son capaces de dirigir dichos movimientos. Cada neurona fue representada como un vector individual y posteriormente cada uno de ellos fue sumado con el fin de entregar, como resultado final de dicha operación matemática, un vector de población, lo que respaldaba la idea de que las neuronas trabajan en grupos distribuidos (Georgopoulos, Schwartz y Kettner, 1986).

En la actualidad el concepto de código de poblaciones ha seguido siendo bastante estudiado en base a diferentes trabajos experimentales. Existe un fenómeno llamado *selectividad mixta*, que logra explicar cómo la corteza prefrontal es capaz de mantener la información de la memoria operativa en presencia de un estímulo distractor. De acuerdo a lo anterior, al aplicar dicho estímulo, la información radicada en la corteza prefrontal lateral puede reorganizarse en un patrón de actividad distinto, creando de este modo un código estable transformado sin conducir a la pérdida de información, fenómeno que no ocurre en las poblaciones neuronales oculares, donde sí existe inestabilidad del código y una pérdida de información luego de la presentación de un estímulo. Con ello se pone de manifiesto el hecho de que las neuronas con respuestas mixtas y selectivas son necesarias y suficientes para producir la transformación del código de poblaciones, siendo éstas más abundantes en la corteza prefrontal lateral. Particularmente, estas neuronas son capaces de proporcionar a las poblaciones neuronales una capacidad importante para modificar su código, estableciendo con ello parámetros importantes que podrían constituir la base para la flexibilidad cognitiva (Parthasarathy, Herikstad, Bong, Medina, Libedinsky y Cheng-Yen, 2017).

Es interesante acotar que el comportamiento depende de la actividad distribuida y coordinada de poblaciones neuronales (Onken, Karunasekara, Kayser y Panzeri, 2014). Esta propuesta pone de manifiesto el hecho de que la actividad de una población de neuronas es susceptible de ser medida a través de estudios de registro de neuronas e, incluso, a través de neuroimagen. El registro de neuronas a nivel múltiple proporciona información respecto de cómo la correlación de la actividad de una agrupación local de células logra moldear el procesamiento de la información en una red local, mientras que los estudios de neuroimagen permiten examinar cómo los estados cerebrales generan un impacto determinado en la percepción (Panzeri, Macke, Gross y Kayser, 2015). La importancia de esta propuesta radica en que la comprensión de las propiedades y principios del código de poblaciones requiere de la identificación de diversos patrones que otorguen información espacio – temporal de actividad multineuronal y cómo las propiedades de codificación pueden ser afectadas por cambios de estado a gran escala.

Este modelo exhibe las siguientes ventajas en comparación con la perspectiva de Convergencia Jerárquica:

- I. El poder de combinatoria es bastante más alto que el del modelo anterior. Esto significa que con una cierta cantidad de elementos dentro del sistema se logran representar diferentes estados de actividad. Al generarse un funcionamiento altamente combinado, al transcurrir de un estado a otro, las mismas neuronas de la población logran realizar un cambio en su actividad (Maldonado, 2007). Un

ejemplo claro de ello es el funcionamiento de la corteza auditiva de los primates, que funciona a través de esta modalidad (Inze, Panzeri y Kayser, 2013).

- II. El sistema se constituye de una forma mucho más robusta que en el modelo anterior, dado su alto poder de combinatoria (Maldonado, 2007).

Con ello se pone de manifiesto la idea de que las neuronas trabajan en poblaciones distribuidas. La siguiente propuesta da paso a un sistema mucho más robusto y complejo que el anterior y pone de manifiesto la capacidad de las neuronas para poder sincronizarse en el tiempo y trabajar en grupos basados en patrones temporales de descarga.

## Perspectiva 3: correlación temporal o modelo de poblaciones sincrónicas

Para la Correlación Temporal o modelo de Poblaciones Sincrónicas (*Temporal Correlation/Synchronous Populations*) cobra especial relevancia el factor de coordinación temporal, el cual hace referencia principalmente a los hilos de tiempo que las neuronas utilizan para su funcionamiento, logrando de este modo procesar la información recibida y además elaborar la que será transmitida hacia otras neuronas. Así, el sistema logra establecer el fenómeno de la cognición y el establecimiento de estados mentales (López y Font, 2014).

Existen de este modo poblaciones activas de neuronas que logran ser diferenciadas unas de otras a partir de ciertas características temporales de descarga. Esto otorga al sistema una robustez mayor que los dos anteriormente presentados. Con ello se puede obtener un estado cognitivo que se encuentra determinado por ensamblajes neuronales que están definidos por su activación y sincronía. Esto quiere decir, además, que en una agrupación de neuronas se pueden contar muchos estados posibles y simultáneos, pero que se encuentran definidos por su tasa de descarga sincrónica (Egorov y Draguhn, 2013).

Es interesante acotar que la sincronización neuronal ofrece un amplio panorama para el funcionamiento adecuado de grupos de neuronas. Por ejemplo, es posible obtener una modulación adecuada entre procesos excitatorios e inhibitorios entre ellas. Además, logra asegurar que un patrón de activación presináptica llegue a las neuronas postsinápticas a través de una coordinación temporal (Fries, 2016). Con ello es posible que varios ritmos sincronizados de descarga generen niveles de comunicación neuronal efectiva, precisa y selectiva.

Con esto se pone de manifiesto además que el principio organizador de la corteza cerebral no radica en la conectividad fija de los diferentes circuitos ni en las áreas cerebrales, sino en el proceso de código de tiempo, donde los diferentes módulos cerebrales interactúan entre ellos, siendo exigidos por la sincronización, y haciendo que los circuitos logren trabajar en la misma longitud de onda. Para lograr este fenómeno se debe conseguir un freno de la actividad de unos u otros a fin de colocar a la misma hora los relojes neuronales (López Moratalla y Font Arellano, 2014).

Actualmente, se sabe las células gliales poseen un rol fundamental en el proceso de sincronía neuronal, quienes además dentro de sus múltiples funciones también participan en los procesos de aprendizaje y la neurogénesis (Jorquera, 2017). Dentro de este grupo, los astrocitos adquieren especial importancia, puesto que al reconocer la actividad neuronal son capaces de generar un incremento de calcio a nivel intracelular. Precisamente las señales de calcio se encuentran implicadas en muchas funciones propias de los astrocitos que dependen de la actividad sináptica y, dentro de ellas se encuentra la sincronización neuronal (Aguilar, 2017).

Esta propuesta ha alcanzado una importancia actual que ha permitido otorgar explicaciones contundentes acerca de ciertas condiciones presentes en una amplia gama de trastornos neurológicos y psiquiátricos, así como dentro de los diferentes estudios realizados en Neurociencias Cognitivas y de Sistemas. Existen ejemplos concretos que basan su explicación en cuadros que ponen de manifiesto el fenómeno de sincronía neuronal. Entre ellos podemos considerar las bases neurobiológicas de la epilepsia, cuya principal manifestación clínica son las convulsiones. Una convulsión tiene como causa una tasa de disparo excesiva de la red neuronal (convirtiéndolas en neuronas hiperexcitables), generando un fenómeno de hipersincronización, en el cual una neurona hiperexcitable es capaz de conducir a la excitabilidad excesiva de un número alto de neuronas circundantes (Mandal, 2016).

Con el avance de las matemáticas y la física se van configurando nuevas perspectivas, que complejizan y complementan lo anteriormente descrito, dando paso al concepto de Red Neuronal, que en la actualidad ha cobrado bastante relevancia.

#### Perspectiva 4: la red neuronal como un nuevo escenario de cara al futuro

Tal y como se mencionó en párrafos anteriores, el cerebro constituye una maquinaria de extraordinaria complejidad estructural y funcional. Posee la capacidad de organizar neuronas de diferente manera y, del mismo modo, establecer, mediante esta organización, la realización de diferentes operaciones mentales relacionadas, por ejemplo, con los sistemas de memoria, lenguaje, atención, funciones ejecutivas, entre muchas otras. La eficiencia que el cerebro puede lograr a través de este proceso no sería posible si no fuese por la existencia de un proceso llamado *transmisión sináptica*, que se encarga de mediar las interacciones entre las neuronas. En los vertebrados el tipo de sinapsis más común lo constituye la sinapsis química, que opera a través de la liberación de una sustancia química específica llamada *neurotransmisor*, el cual actúa como un intermediario difusible entre una neurona presináptica y la especialización postsináptica (que puede ser una neurona, un músculo o una glándula), generando un efecto en esta última pudiendo otorgar una reacción excitatoria o inhibitoria en el sistema (Ferrero López, 2016; Aguilar, 2017; Katz, 1997).

Un aspecto muy importante que debe ser considerado, dentro del análisis estructural y funcional de un cerebro adulto, es la *plasticidad neuronal*, la cual confiere al cerebro la capacidad de modificarse a través de la experiencia, constituyendo un mecanismo altamente relevante para nuestro entendimiento del trabajo de las neuronas como unidades de procesamiento de información en el sistema nervioso conectándose entre sí (Garcés – Vieira y Suárez- Escudero, 2014).

Luego de muchos estudios realizados y aproximaciones teóricas se ha llegado a la conclusión de que las neuronas podrían interactuar entre sí a través de un mecanismo mucho más complejo y elaborado del que ya se conocía. Con el auge alcanzado por la informática y con la creciente idea de que el cerebro podría tener un funcionamiento similar a un sofisticado computador es que surgen nuevas perspectivas de abordaje de las conexiones neuronales. Es aquí donde llegamos al concepto de *red neuronal*, el cual hace referencia a un modelo que implica el establecimiento de un circuito distribuido en el que las neuronas se conectan entre sí a través de puntos que pueden ser modificados a través de reglas de aprendizaje (Yuste, 2015). Con ello también se pone de manifiesto la idea de que cada circuito neuronal posee una *fuerza sináptica* determinada, la cual es susceptible de ser modificada gracias a dos factores principales: la densidad de receptores en la zona postsináptica y la cantidad de vesículas liberadas en un potencial de acción. Con ello, la red neuronal pasa de ser un código de tipo relacional a un código de tipo funcional, el cual puede ser utilizado en el tiempo cuando se despliega una función cognitiva específica (Fuster, 2014).

El concepto de red neuronal ha tendido a poseer una relación muy estrecha con la informática. Los primeros modelos propuestos asociaban la idea del procesamiento neuronal con la base matemática del cálculo digital y, cuyo principal mentor fue Alan Turing. Con ello se pone de relieve el hecho de que una red neuronal puede constituir un elemento útil para comprender el funcionamiento cerebral gracias a que proporcionan cálculos emergentes (Yuste, 2015).

Con posterioridad, y a medida que los descubrimientos científicos y tecnológicos iban progresando, se llegó a nuevas perspectivas. De esta manera, comienzan a plantearse diferentes modelos de estudio tales como:

- I. El modelo *Feedforward Network*, que pone de manifiesto el concepto de *perceptrón multicapa* como modelo matemático de procesamiento de información en una red neuronal (Vidal, 2015). En él se plantea la idea de la interacción de tres capas secuenciadas de neuronas y cuya conexión posee una fuerza sináptica o peso sináptico determinado, donde el flujo de información se desarrolla de un modo unidireccional a través de tres capas: una de entrada, una intermedia y otra de salida.
- II. El modelo de *Red Recurrente (Atractor)*, el cual plantea una perspectiva muy similar a la anterior, con patrones de conectividad simétricos y cuya modalidad de funcionamiento se convierte en un “atractor” de patrones de actividad estable (Yuste, 2015).
- III. El *modelo de Hopfield*, que desarrolla una función de energía para lograr la comprensión de la dinámica de un circuito neuronal recurrente cuyos componentes son uniones sinápticas simétricas (Pavez, 2014).

Es muy interesante acotar que, gracias a estos modelos, los investigadores en Neurociencia han logrado realizar descubrimientos de capital importancia para el desarrollo de nuevas técnicas de estudio de diversas estructuras del sistema nervioso central. Uno de los fenómenos que más ha llamado la atención de los científicos es el funcionamiento de las redes neuronales del

hipocampo en los mamíferos. Es conveniente recordar que las redes hipocámpales juegan un rol fundamental en el proceso de aprendizaje del individuo, en especial en el sistema de memoria declarativa (Olivares, Juárez y García, 2015). Los modelos de redes neuronales han permitido, en base a estos tópicos, estructurar, diseñar e interpretar nuevas formas de experimentación. En el estudio de redes hipocámpales se ha visto cómo el flujo de información se ve representado a través de redes neuronales recurrentes de tipo atractor. Del mismo modo, se ha estudiado el mecanismo de trabajo de las células de la cuadrícula en la corteza entorrinal, tarea que sería muy difícil de realizar a través del modelo de estudio de una neurona individual (Colgin, Leutgeb, Jezek, Leutgeb, Moser, McNaughton y Moser, 2010).

En relación a lo anterior, otro aspecto interesante que es necesario acotar es el hecho de que la corteza parietal posterior posee un papel muy importante en variados procesos cognitivos, entre ellos el poder conformar una área asociativa de diferentes modalidades que entregan una representación del espacio unificada y multimodal (Moraleda, Romero y Cayetano, 2014). Se ha conocido que, durante las tareas que implican una decisión perceptual y navegación guiada a través del sistema de memoria de trabajo en un entorno virtual, las neuronas involucradas realizan su trabajo en una red organizada, a través de la expresión de diversos patrones de actividad espacial y temporal en la corteza parietal posterior. Dichos patrones generan registros secuenciados de neuronas en red, otorgando la idea de que las redes neuronales son circuitos dinámicos, cuyos estados de actividad pueden cambiar en el tiempo, en lugar de establecer estados de actividad estables de larga duración (Harvey, Coen y Tank, 2012).

El estudio del cerebro a través de modelos de redes neuronales ha continuado marcando precedentes en Neurociencias. Con el surgimiento de nuevas técnicas de trabajo y, por ejemplo, gracias a los trabajos de científicos de renombre mundial como John O’Keefe, May-Britt Moser y Edvard Moser (ganadores del Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 2014) es que se han reivindicado posturas teóricas como la teoría cognitivista a través de la experimentación en animales con el establecimiento del concepto de *mapa cognitivo*, a través del cual se demuestra la existencia de redes neuronales en el hipocampo que se encargan de indicar el lugar que el individuo ocupa en un espacio determinado y que conforman lo que se conoce como *mapa egocéntrico*, y la representación del espacio que rodea al sujeto en las redes neuronales de la corteza entorrinal constituyendo lo que se conoce como *mapa alo-céntrico* (Aguilar, 2015). Con ello, el modelo de red neuronal como nuevo paradigma de estudio del código neural alcanza una particular importancia, dado que logró dotar a los investigadores de nuevas herramientas para combinar la observación de la conducta con la actividad eléctrica neuronal en animales que no poseen restricción de movimiento.

#### Nuevos métodos y proyecciones para el estudio de las redes neuronales

No es casualidad que los avances tecnológicos actuales hayan permitido a los investigadores continuar adentrándose en los enigmas del cerebro y, particularmente, en continuar con la ardua tarea de comprensión del funcionamiento del código neuronal, afianzando los lazos entre las diversas técnicas y los paradigmas científicos. Los avances en diversas modalidades de estudio, tales como el electroencefalograma (EEG), el desarrollo de los tétrods, las matrices de electrodos múltiples, entre muchas otras técnicas, han permitido a los neurofisiólogos comprender y descifrar las propiedades emergentes de los circuitos neuronales y su conectividad funcional en zonas tan complejas en su morfología y fisiología como la retina (Yuste, 2015). Del mismo modo, los avances obtenidos en metodología de sondas ópticas han permitido observar y analizar con detalle las diferentes regiones de una neurona y también visualizar su actividad dentro de los circuitos en que ésta se mueve. Adicionalmente, el análisis óptico de imágenes en tres dimensiones ha logrado además adquirir nuevas perspectivas cuantitativas y cualitativas en el procesamiento de datos y el entendimiento del código neuronal por parte de los neurocientíficos (Quirín, Jackson, Peterka y Yuste, 2014).

También, los mecanismos de estudio aportados por la optogenética han permitido obtener imágenes de alta resolución de una neurona individual y, simultáneamente, observar los patrones de actividad espacio-temporales presentes en una red neuronal (Packer, Russell, Dalglish y Hausser, 2015).

Por último, los diferentes enfoques de tipo computacional, tales como los métodos de reducción de dimensionalidad y el análisis de sistemas dinámicos, entre muchas otras técnicas (Churchland, Cunningham, Kaufman, Foster, Nuyujukian, Ryu y Shenoy, 2012) han permitido estudiar la multidimensionalidad de la dinámica neuronal logrando realizar sondeos en áreas cada vez más profundas del cerebro, comprendiendo de este modo el código neuronal de una forma mucho más acabada y precisa.

## Conclusiones

Los extraordinarios avances científicos de las últimas décadas han propiciado grandes descubrimientos en Neurociencias y, muy específicamente, en los diversos modelos de redes neuronales que intentan explicar el funcionamiento del cerebro en lo que a percepción e integración sensorial se refiere. Pese a lo anterior, la Neurociencia aún posee una tarea pendiente: la de unificar criterios para lograr una explicación contundente acerca de cómo funcionan los circuitos neuronales y cómo éstos se relacionan con la conducta y los estados mentales.

Hay muchas interrogantes sin resolver que incluso están asociadas al procesamiento sensorial de una neurona individual. Pese a esto se ha asumido la idea del funcionamiento en red de las neuronas. Con ello la idea del código de poblaciones adquiere una especial relevancia, pero pese a ello, la adopción de la codificación neuronal como paradigma continúa teniendo muchos retos por delante, en especial debido a que no se sabe con certeza si poseen el suficiente valor predictivo para lograr explicar el funcionamiento de las redes cerebrales. Existen aportes realizados, en especial desde la ingeniería, que intentan apoyar el hecho de que las redes neuronales artificiales, por ejemplo, pudiesen explicar el funcionamiento de la maquinaria cerebral.

Dicho esto, es necesario comprender que el concepto de Código Neuronal es transversal a los diferentes mecanismos cerebrales involucrados en la cognición y la conducta, pese a que en la literatura se otorga un mayor realce al sistema visual. En este sentido el sistema somatosensorial adquiere una especial relevancia dado a que es un modelo ideal para estudiar los diferentes mecanismos neurales que subyacen a la percepción y el impacto que éstos generan en la conducta (Felleman y Van Essen, 1991). Con ello se pone de manifiesto la variabilidad de sistemas involucrados en el procesamiento de la información a nivel cerebral y la susceptibilidad de ser estudiados a través de las distintas propuestas presentadas en esta revisión.

Lo expuesto en este trabajo de revisión son sólo cuatro de tantas perspectivas que se han ido configurando con el paso del tiempo. Existen muchas otras visiones que intentan explicar el código neuronal y los diferentes fenómenos asociados a la integración sensorial en el cerebro. En Neurociencias, así como en muchas otras disciplinas, es necesaria la interdisciplinariedad, el aporte de diferentes especialistas que sean capaces de combinar de un modo efectivo las aproximaciones físicas, matemáticas y biológicas del funcionamiento del cerebro y que permitan continuar realizando aportes concretos y enfocados al alcance del conocimiento. La Neurociencia del futuro, sin duda, estará marcada por los aportes que diferentes disciplinas puedan realizar. La investigación del futuro podría realizar descubrimientos sustanciales y relevantes para contribuir a revelar la real naturaleza del código neuronal e, incluso, dar respuesta a muchas otras interrogantes tales como el sustento biológico del aprendizaje, los sistemas de memoria, los sistemas atencionales, los sistemas motores y, sobre todo, las funciones cognitivas de alto nivel como lo son las funciones ejecutivas. Son pasos necesarios para el esclarecimiento de diferentes enigmas que aún continúan sin resolverse, ya sea desde la normalidad para entender el funcionamiento de los procesos mentales, e incluso también desde la patología, contribuyendo con ello al engrandecimiento de la Neurociencia como disciplina y su conexión con otras áreas del conocimiento.

## Agradecimientos

Expreso mis más profundos y sinceros agradecimientos al profesor Dr. Pedro Maldonado Arbogast, del *Biomedical Neuroscience Institute* (BNI) de la Universidad de Chile, por la revisión crítica y asesoría científica otorgadas para la elaboración de este artículo.

## Referencias

Aguilar, F. (2017). *Implicación de las células gliales de microglía y astrogliá en los procesos de aprendizaje y memoria de reconocimiento de objetos* (Tesis Doctoral), Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España.

Aguilar, R. (2015). El sistema de posicionamiento cerebral: Premio Nobel en Fisiología y Medicina 2014. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 58(3), 53-58.

Bonner, M.F., Peelle, J.E., Cook, P.A. y Grossman, M. (2013). Heteromodal conceptual processing in the angular gyrus. *Neuroimage*, 71: 175-186.

Braitenberg, V. y Schüz, A. (1998). *Anatomy of the Cortex*. Berlín: Springer Verlag.

Colgin, L.L., Leutgeb, S., Jezek, K., Leutgeb, J.K., Moser, E.I., McNaughton, B.L. y Moser, M.B. (2010). Attractor-map versus auto-association based attractor dynamics in the hippocampal network. *Journal of Neurophysiology*, 104 (1), 35-50.

Corsi, P. (1991). *El cerebro, del arte de la memoria a la Neurociencia*. Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales.

Churchland, M.M., Cunningham, J.P., Kaufman, M.T., Foster, J.D., Nuyujukian, P., Ryu, S.I. y Shenoy, K.V. (2012). Neural population dynamics during reaching. *Nature*, 487 (7405), 51-6.

Egorov, A. y Draguhn, A. (2013). Development of coherent neuronal activity patterns in mammalian cortical networks: Common principles and local heterogeneity. *Mechanisms of Development*, 130(6-8):412-23.

Escobar, R. (2014). Redes neuronales, procesos cognoscitivos y análisis de la conducta. *Conductual, Revista Internacional de Interconductismo y Análisis de Conducta*, 2, 1, 23-43.

Fell, J. (2004). Identifying neural correlates of consciousness: the state space approach. *Consciousness and Cognition*. 13(4):709-29.

Felleman, D. y Van Essen, D.C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1, 1-47.

Ferrero, J. (2016). *Potenciación de la liberación de glutamato por los receptores metabotrópicos de glutamato de tipo 7 y beta-adrenérgicos* (Tesis Doctoral), Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

Fries, P. (2016). Rhythms for Cognition: Communication through Coherence. *Neuron*, 88, 220-235.

Fuster, J. (2014). *Cerebro y Libertad. Los cientos cerebrales de nuestra capacidad para elegir*. Barcelona: Ariel.

Ganmor, E., Segev, R. y Schneidman, E. (2015). A thesaurus for a neural population code. *E-Life*, 4, e06134.

Georgopoulos, A.P., Schwartz, A.B. y Kettner, R.E. (1986). Neuronal population coding of movement direction. *Science*, 233 (4771), 1416 - 1419.

Garcés-Vieira, M. y Suárez-Escudero, J. (2014). Neuroplasticidad: aspectos bioquímicos y neurofisiológicos. *Ces Medicina*, 28 (1), 119-132.

Harvey, C., Coen, P. y Tank, D. (2012). Choice-specific sequences in parietal cortex during a virtual - navigation decision task. *Nature*, 484 (7392), 62-68.

Ince, R., Panzeri, S y Kayser, C. (2013). Neural codes formed by small and temporally precise populations in auditory cortex. *The Journal of Neuroscience*, 33 (46), 18277-18287.

Jorquera, P. (2017). *Estudio de la función de PSD-95 en el desarrollo de nuevas neuronas generadas en el hipocampo de cerebro de ratón adulto* (Tesis de Magister). Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile.

Katz, E. (1997). *Canales de calcio y liberación del neurotransmisor en sinapsis normales y en regeneración de la placa neuromuscular de vertebrados* (Tesis Doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

López, N. y Font, M. (2014). *El cerebro registra la vida momento a momento. Maduración del cerebro adolescente*. Madrid: Digital Reason.

Llacuna-Morera, J. y Guárdia, J. (2015). Dimensión cuerpo-mente. De Spinoza a Damasio. Imágenes, signos, emociones y sentimientos en el lenguaje. *Anuario de Psicología*. 45 (1); 7-23

Maidana, M. (2013). *Codificación en sistemas neuronales estocásticos* (Tesis de Magister). Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Maldonado, P. (2007). What we see is how we are: New paradigms in visual research. *Biological Research*, 40, 439 - 450.

Malsburg, V (1985) Nervous structures with dynamical links. *Ber Bunsenges Phys Chem*, 89: 703-710

Malsburg, V y Singer W (1988) *Principles of Cortical Network Organization*. En: *Neurobiology of Neocortex*, eds. P. Rakic and W. Singer, pp. 69-99, John Wiley and Sons Ltd.

Man, K., Kaplan, J., Damasio, H. y Damasio, A (2013). Neural convergence and divergence in the mammalian cerebral cortex: From experimental neuroanatomy to functional neuroimaging. *Journal of Comparative Neurology*, 521 (18), 4097 - 4111.

Mandal, A. (2016). Fisiopatología de la Epilepsia. Recuperado de: <https://medicapage.com/index.php?newsid=1073>.

Martínez Selva, J. (2017). Cambios conceptuales en las explicaciones biológicas del comportamiento. *Factum*, 18, 33-48

Olivares, HJD., Juárez, AE. y García, GF. (2015). El hipocampo: neurogénesis y aprendizaje. *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*. 15 (1), 21-28.

- Onken, A., Karunasekara, C., Kayser, C. y Panzeri, S. (2014). Understanding Neural Population Coding: Information Theoretic Insights from the Auditory System. *Advances in Neuroscience*, 2014, 1-14.
- Packer, AM., Russell, LE., Dalgleish, HW. y Hausser, M. (2015) Simultaneous all-optical manipulation and recording of neural circuit activity with cellular resolution in vivo. *Nature Methods*. 12 (2), 140-146.
- Palacios, L., Vergara, L., Liévano, J. y Guerrero, A (2015) Santiago Ramón y Cajal, neurocientífico y pintor. *Acta Neurológica Colombiana*. 31(4):454-461.
- Panzeri, S., Macke, J., Gross, J. y Kayser, C. (2015). Neural population coding: combining insights from microscopic and mass signals. *Cell Press*. 19 (3), 162-172.
- Parthasarathy, A., Herikstad, R., Bong, J., Salvador Medina, F., Libedinsky, C. y Cheng-Yen, S. (2017). Mixed selectivity morphs population codes in prefrontal cortex. *Nature Neuroscience*. 20, 1770 – 1779.
- Pavez, R. (2014). *Estimación de costos para la fabricación de tuberías, utilizando redes neuronales polinomiales con algoritmos genéticos* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- Quirín, S., Jackson, J., Peterka, DS. y Yuste, R. (2014). Simultaneous imaging of neural activity in three dimensions. *Frontiers in Neural Circuits*. 3, 8-29.
- Quian, R. (2008). Las neuronas de la conciencia. *Ciencia Cognitiva: Revista Electrónica de Divulgación*. 2 (2), 47-49.
- Revista Médica Electrónica Portales Médicos. (2014). Neuropsicología de la Navegación Espacial. Huelva, España.: Revista Portales Médicos. Recuperado de <https://www.revista-portalesmedicos.com/revista-medica/neuropsicologia-de-la-navegacion-espacial/>
- Rohlf, P. (2016). Desarrollo del sistema nervioso humano. Perspectiva general del estadio prenatal hasta 2013. *Revista Internacional de Psicología*, 15(1), 1-50
- Treviño, M y Gutiérrez, R. (2007). Las bases celulares de las oscilaciones neuronales. *Salud Mental*, 2, 11-18
- Vidal, M. (2015). *El uso del Perceptrón Multicapa para la clasificación de patrones en conductas adictivas* (Tesis de Pregrado). Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, Islas Baleares, España.
- Yuste, R. (2015). From the neuron doctrine to neural networks. *Nature Reviews*, 16, 487 – 497.
- Zulamabe-Makirriain, J. (2016). El estudio neurológico de la conciencia: Una valoración crítica. *Anales de Psicología*, 32 (1), 266-278.