

Una perspectiva naturalizada del concepto de información en el sistema nervioso

Álvaro Moreno¹ and Xabier Barandiaran²

¹ University of the Basque Country,
Post Box 1249, 20080 Donostia - San Sebastian, Spain

ylpmobea@sf.ehu.es,

<http://ehu.es/ias-research/moreno>

² xabier@barandiaran.net,

<http://ehu.es/ias-research/barandiaran>

Resumen En este trabajo planteamos una revisión crítica del concepto de información neuronal, tal como ha sido entendido dentro del paradigma dominante en neurociencias. A partir de una concepción del organismo como sistema autónomo, reconstruimos desde una perspectiva naturalizada un nuevo concepto de información neuronal, entendida como cierta estructura dinámica desacoplada de los procesos metabólicos y enraizada en las interacciones sensomotrices de un organismo que es recurrentemente seleccionada por éste por su contribución a su auto-mantenimiento.

Palabras clave: información, sistema nervioso, naturalización, autoorganización.

1. Los problemas de la concepción heredada de la información en neurociencia

El concepto de información es, sin duda, uno de los pilares fundamentales de la IA y de las ciencias de la computación. A su vez, el feed-back conceptual y metodológico entre la IA y la neurociencia cognitiva ha sido continuo desde el surgimiento de la cibernética y el desarrollo de la IA a partir de los años 50 (especialmente en lo que se refiere al concepto de información). De hecho, la literatura neurocientífica está cargada de términos que superan el marco descriptivo molecular o bioquímico, introduciendo conceptos como el de *señal*, *código*, *información* o *contenido* desde que en los años 20 y 30 comenzara por primera vez a hablarse de los impulsos nerviosos como vehículos de mensajes [1]. Sin embargo, no sería hasta el desarrollo del concepto de información de Shannon y, sobre todo, del uso generalizado del concepto de representación e información en el campo de la inteligencia artificial (a finales de los años 50) que el uso del término información se extendiera en la literatura neurocientífica. 50 años después, algunas de las características más fundamentales del concepto de información (la semántica entendida como intencionalidad) generan problemas que siguen sin poder resolverse dentro del paradigma computacionalista y representacionalista, comunes tanto en neurociencia como en la IA clásica.

La forma más común en neurociencias de referirse a la información es una forma metodológica o descriptiva, mediante la cual un investigador decide usar el término información para nombrar ciertas regularidades en los fenómenos que observa. El uso de los términos información, código, contenido, significado, etc. en neurociencia teórica está asociado a la correlación entre un estímulo dado y un potencial de acción (o un conjunto de potenciales de acción) en un área específica del sistema nervioso (SN). Esta correlación causal está generalmente expresada como probabilidad condicional de la ocurrencia de un estímulo, dada una medida de impulsos o una combinación de ellos [2], [3]. Esta perspectiva nos permite como mucho predecir (*a posteriori* —después de toda una serie de experimentos) la probabilidad de disparo de una neurona en relación a un estímulo determinado. Hasta aquí la información cumple un papel descriptivo en forma de probabilidad condicional. Sin embargo, implícita o explícitamente, el uso del término viene generalmente asociado a un valor semántico de tipo referencial: el del objeto o propiedades del objeto que hace de estímulo y aparece por tanto correlacionado con mayor o menor probabilidad con la actividad de diversas áreas del SN.

Este concepto de información (y toda la investigación neurocientífica que se realiza a partir de ella) se enfrenta, sin embargo a un problema fundamental. La medida de correlación condicional estímulo-actividad nerviosa en ningún caso *explica* el funcionamiento del SN *en relación a esas correlaciones*. De hecho, la correlación (así explicada, como probabilidad condicional) no es nunca accesible al propio SN sino sólo al observador que accede al estímulo y sus consecuencias dinámicas de forma separada, de tal forma que el proceso resulta informacional para el observador pero no necesariamente para el sistema bajo estudio. En otras palabras: si el contenido semántico está asegurado por la correlación condicional pero ésta es inaccesible para el sistema cognitivo ... ¿en qué sentido supone la probabilidad condicional una explicación semántica de la conducta del sujeto? ¿en virtud de qué se crean y se transforman (corrigen, desechan, modifican) esas correlaciones? ¿cuales son los mecanismo internos que retienen las correlaciones y en virtud de qué (ya que la comparación entre estados del mundo y actividad nerviosa le está, en principio, vedada al SN)? Estas preguntas sugieren que tratemos de dar cuenta del contenido semántico de un proceso informacional desde la perspectiva del organismo, en virtud del modo particular en el que se inserta en su organización conductual, y no desde la perspectiva de un observador externo cuyo acceso privilegiado al origen del estímulo y a la actividad nerviosa permite establecer una correlación entre ambos. Este uso del término información está generalmente asociado a la presuposición (implícita o explícita) de un homúnculo que hace las veces de intérprete del contenido semántico. Lo que permite afirmaciones como la siguiente: “(...) we can ask how the homunculus should best use the spike train data to make a decision about which stimulus in fact occurred.” ([3], página 14). Sin embargo, no se trata tanto de inferir “la realidad” a partir de un conjunto de señales alojadas en alguna parte del SN, sino de explicar cómo se integran las señales informacionales en la producción de conducta, y en virtud

de qué aparecen, para el organismo, asociadas a una intencionalidad o semántica acerca del mundo y devienen, por tanto, informacionales.

Por estas razones, esta concepción de la información neuronal nos parece insostenible. Resulta que el observador tiene que echar mano de un concepto que no puede reconstruir naturalizadamente. La perspectiva naturalizadora opta, en cambio, por una concepción ontológica en la que el término información se refiere a un tipo de causalidad específica en el SN, y que además permita dar cuenta del contenido semántico de un proceso informacional desde la organización misma del agente cognitivo (y, en concreto, de los organismos vivos). Se trata de especificar cómo un proceso físico o biológico deviene informacional no para un observador externo al que se le presuponen ya capacidades cognitivas, sino *en el propio marco* del sistema natural en el que ese proceso tiene lugar, jugando un papel causal específico al constituir una nueva forma de organización en dicho sistema. En concreto, desde una perspectiva naturalista la reconstrucción del concepto de causalidad informacional exige dar cuenta de su aparición diacrónica (en la historia natural) y sincrónica (en la compleja jerarquía organizativa de los seres vivos). La cognición y la información con propiedades semánticas son fenómenos emergentes. Minutos después del *big-bang* no existía el fenómeno cognitivo en el universo (no había nada de lo que pudiéramos predicar capacidades cognitivas). Hoy, en cambio, atribuimos capacidades cognitivas a diversos sistemas que nos rodean, especialmente a nosotros mismos. ¿Cómo ocurrió esta transición en la historia del universo? ¿Qué tipo de organización característica de la materia lo posibilita? ¿Qué papel juega en ella la información? La respuesta a estas preguntas exige un breve recorrido por el origen y organización de la vida y, sobre todo, del SN.

2. La aparición del Sistema Nervioso en la Organización Viviente

Todo ser vivo individual es un sistema *autónomo* que desarrolla interacciones sobre su entorno como parte sustancial de su propio proceso de automantenimiento. Esta capacidad de ejercer interacciones, sostenidas por su organización interna, lo constituye como un *agente*. Con la excepción de algún tipo de bacteria que vive en un entorno muy homogéneo y estable, todos los seres vivos tienen mecanismos internos que compensan en tiempo somático, dentro de ciertos márgenes, las diferentes condiciones de su entorno: es decir, son agentes *adaptativos*. Los organismos tienen la capacidad de detectar aquellas modificaciones en su entorno que son relevantes para su mantenimiento, y desencadenar ciertos procesos internos y externos que contribuyen a restablecer las condiciones de su mantenimiento. Hay pues un principio normativo interno en la organización viva, que se expresa en la regulación adaptativa. Esta capacidad está basada en la modificación funcional de su plasticidad metabólica en consonancia con los cambios relevantes (para su funcionamiento) que el organismo detecta en su entorno [4].

En los unicelulares y en las plantas la agencialidad adaptativa está soportada por la organización metabólica. Sin embargo, la organización metabólica no permite soportar un rápido y versátil abanico de respuestas para los organismos multicelulares cuya forma de vida está basada en el movimiento. Sabemos que el problema se resolvió con la aparición del SN. Probablemente este hecho fue resultado de la combinación de dos factores: 1) la aparición (como consecuencia de un proceso de diferenciación celular) de un nuevo tipo de células (las neuronas) capaces de conectar de manera plástica, rápida y (metabólicamente hablando) económica, superficies sensoras y motoras; y 2) la aparición de algún tipo de metazoo cuyo plan corporal permitiera reclutar a estas células para sostener formas de agencialidad sensomotriz muy sencillas. La potenciación de la conducta motriz que, presumiblemente, debió de producirse sería la base de un proceso evolutivo en el que se seleccionarían aquellos animales que poseyeran redes de neuronas interconectadas, actuando como soporte de comportamientos sensomotrices funcionales.

Pero, además de permitir el desarrollo de la motilidad en organismos multicelulares, la aparición del SN ha abierto el paso a nuevas (cualitativamente diferentes) formas de interacción adaptativa, muchísimo más complejas que todas las demás. Ya en los primeros estadios evolutivos del SN aparecen formas rudimentarias de aprendizaje, categorización y memoria [5]. Esta potencialidad de soportar complejidad agencial reside en la capacidad que tiene el SN de generar un dominio propio con un enorme número de configuraciones, cuya dinámica concreta no puede ser especificada por la organización básica del organismo.

3. Estructura y función del sistema nervioso

Las neuronas presentan una serie de características propias ausentes en las células que forman otros tejidos o sistemas dentro del organismo³. La interacción entre la dinámica básica generada por los potenciales de acción y otros procesos de segundo orden, como su sincronización a diversas escalas temporales y espaciales, permite generar (con relativamente pocas neuronas) una gran complejidad dinámica. Estas características permiten una conectividad recursiva y una velocidad de interacción *selectiva* interneuronal en frecuencias de interacción muy superiores a las que rigen cualquier otro proceso de control en el organismo. Esto dota a la red interneuronal de unas características especiales

³ Como son: a) la capacidad para el bombeo activo de iones que permite la propagación (sin disipación, e.d. sin pérdida de variabilidad) del cambio del potencial de membrana a lo largo del cuerpo celular y sus extremidades, b) conectividad conductiva con otras neuronas a través de superficies sinápticas con receptores químicos que permiten la regeneración (variable) del cambio de potencial de membrana de las neuronas vecinas, c) ramificaciones a largas distancias del cuerpo celular (desde 0.1mm hasta 3 metros) d) no-linealidad del potencial de respuesta y e) plasticidad (variabilidad) a múltiples escalas temporales y biofísicas en relación a las respuestas a los cambios de potencial y sinápticos (crecimiento dendrítico, variación de concentraciones de neurotransmisores en las sinapsis, cambios moleculares, etc.)

en el conjunto del organismo: ningún otro sistema intercelular tiene la capacidad, ni de lejos, que tiene el SN de correlacionar funcionalmente tantas unidades y, al mismo tiempo, de modificar selectivamente los estados de dichas unidades tan rápidamente. *La particularidad del SN es, por tanto, su capacidad de generar una variedad enorme de estados (configuraciones) por unidad de tiempo y de coordinar un número inmenso de transformaciones de estado paralelamente.* Características todas ellas (como veremos) propicias para la generación de procesos autoorganizativos de regulación. Dicho de otro modo: las neuronas son un tipo extremadamente peculiar de células que se han seleccionado por su capacidad para mantener una compleja, plástica y rápida dinámica de interacciones entre sí, minimizando la interferencia con procesos metabólicos locales. Y con el resto de órganos y sistemas biológicos de carácter metabólico (sistema circulatorio, respiratorio, digestivo, etc.).

Este último factor (la minimización de interferencias con procesos metabólicos locales) va a ser de fundamental importancia, ya que va a definir el aspecto *desacoplado* del SN: e.d. su dinámica va a quedar subdeterminada por los procesos puramente metabólicos (autoconstructivos) de la estructura biológica que lo sustenta (el conjunto de la infraestructura neuronal). El desacoplamiento jerárquico del SN apunta a una doble condición del mismo: está localmente construido por procesos metabólicos (aspecto jerárquico: el SN emerge de procesos metabólicos) y, sin embargo, éstos no son suficientes para explicitar completamente su dinámica funcional (aspecto desacoplado) [6]. Otro factor que contribuye a esta subdeterminación de la dinámica neuronal por constricciones metabólicas es su acoplamiento adicional con su entorno sensomotor a través de la interfaz del cuerpo. Su corporización (*embodiment*) y su “estar situado” (*situatedness*) hacen que la dinámica del SN responda también a factores interactivos inscritos en ciclos sensomotores.

El SN presenta además una dinámica interna reticular, cohesiva y recurrente capaz de mantener patrones invariantes frente a perturbaciones internas y externas, de tal manera que su complejidad dinámica interna es mayor que la dinámica interactiva que establece con su entorno. Esta asimetría de complejidad hace que su dinámica aparezca en buena medida como *autodeterminada*. Si para un momento dado quisiéramos predecir la evolución de la dinámica neuronal, el conocimiento del estado metabólico de sus componentes aislados no nos serviría de gran cosa. Por el contrario, tendríamos que atender al contexto corporal y ambiental en el que se encuentra el organismo y, sobre todo, a la propia dinámica interna que es recursivamente generada atendiendo a sus propiedades holistas de red, más allá de las interacciones celulares locales.

Podemos ahora responder apropiadamente a la cuestión de la *función* del SN en el conjunto del organismo: el control de los ciclos de interacción (de la clausura interactiva necesaria para el automantenimiento del sistema autónomo) a través de una red desacoplada de la dinámica metabólica, pero inserta en una interfaz corporal (sistemas musculo-esquelético y perceptivo). Por un lado, podemos observar el flujo material y termodinámico que se realiza entre la ingestión y digestión de alimentos y oxígeno, su secreción y la disipación de calor

en el cuerpo, junto a toda la maquinaria autoconstructiva del organismo y la infraestructura necesaria para su mantenimiento (sistema circulatorio, digestivo, respiratorio, etc.). Por otro lado, observamos un ciclo sensomotor de conducta adaptativa regido por una infraestructura (sistema sensomotor y SN) dinámicamente desacoplada de los procesos metabólicos (aunque sustentada en ellos). La funcionalidad del SN viene dada por la forma en la que se conectan ambos procesos a un nivel superior. Esta relación funcional exige que la dinámica interactiva controlada por el SN satisfaga las condiciones de automantenimiento del organismo, más concretamente, debe satisfacer las condiciones de contorno del flujo termodinámico biológico. Desde el punto de vista del funcionamiento dinámico del SN, la satisfacción de estas condiciones de contorno del flujo termodinámico aparecen como lo que Ashby [7] denominó *variables esenciales*: un conjunto de variables (temperatura, input nutricional, etc.) que deben ser mantenidas dentro de unos límites de viabilidad. Será en torno al mantenimiento homeostático de estas variables que se construya la dinámica cohesiva del SN y su organización interna (sin que, como veremos más adelante, quede totalmente determinada por estas constricciones de adaptabilidad). La dinámica del SN va a estar en última instancia evaluada por su contribución al automantenimiento del organismo, tanto a escala filogenética como ontogenética. La corporización del SN (como sistema jerárquicamente desacoplado) se entiende así en un doble sentido de interfaz interactiva con el mundo y de enraizamiento biológico, mediante el cual el metabolismo sostiene constructivamente al SN y éste contribuye a satisfacer las necesidades interactivas de aquél (intercambio termodinámico con el entorno).

4. Autoorganización y causalidad dinámica en el SN

La autoorganización de los impulsos neuronales en diferentes escalas hace que se generen estructuras intermedias (patrones), y que éstos entren a interactuar entre ellos y a organizar la dinámica global del sistema más allá de las interacciones locales de impulsos. Esto nos obliga a distinguir entre niveles dinámicos micro y macro (y entre diversas jerarquías de niveles) y nos permite también hablar de una funcionalidad emergente (e.d. de procesos microscópicos neuronales cuya contribución al automantenimiento del sistema viene marcada por los patrones emergentes que constituyen o en los que participan). Por un lado, la organización de los impulsos neuronales en procesos masivamente paralelos y autoorganizados hace que se diluya la causalidad efectiva de cada uno de los impulsos específicos. Por otro lado, la transformación de patrones globales regenera una causalidad funcionalmente efectiva a un nivel superior. Esto permite hablar de una microdinámica de la que emerge una macrodinámica neuronal funcional. La consecuencia principal de este emergentismo causal es la dificultad de una estrategia localizacionista en el estudio de los procesos cognitivos. El localizacionismo opera haciendo una descomposición estructural del sistema y otra funcional y estableciendo un mapeo entre ambos tipos de descomposición para dar lugar a una explicación causal estructura-función en la que los componentes se agregan linealmente para reconstruir los procesos causales que gobiernan

al sistema [8]. Sin embargo, la autoorganización del funcionamiento dinámico que hemos visto no permite llevar a cabo con éxito esta estrategia, ya que la funcionalidad emerge de la interacción no-lineal entre los componentes [9]. La perspectiva de que la cognición es el resultado de la integración a gran escala de la actividad de conjuntos neuronales distribuidos es cada vez más extendida entre muchos neurocientíficos [10] [11] [12]. La perspectiva más clásica (heredada de la inteligencia artificial tradicional o representacionalista) asume que el cerebro opera en base a módulos funcionalmente específicos de tal manera que la conducta cognitiva es el resulta del procesamiento informacional intramodular y su comunicación inter-modular. Los modelos de integración a gran escala, sin embargo, defienden que la conducta cognitiva es el resultado de patrones globales de oscilación emergen de la interacción dinámica recíproca entre múltiples conjuntos dispersos de neuronas en el SN. Lo que ha llevado a muchos autores a descartar, prematuramente, el uso del concepto de información semántica (o representación) en el SN.

Un ejemplo paradigmático de autoorganización dinámica a escala neuronal en circuitos locales es el de los CPG. Los CPG (o *central pattern generator*) son conjuntos de neuronas que generan patrones multiestables de impulsos que controlan las neuronas motoras [13] en ausencia incluso de inputs perceptivos (e.d. de forma autogenerada). La generación de patrones estables por el CPG es crucial para constreñir los grados de libertad del sistema muscular y generar un movimiento coherente. Veamos cómo funciona este proceso autoorganizado. Algunas de las neuronas que componen los circuitos de los CPG generan impulsos rítmicos por sí mismas, estas neuronas se acoplan entre sí y con el resto de las neuronas del circuito, generando un patrón global estable. Los CPG son capaces de mantener ese patrón frente a diversas perturbaciones, incluyendo lesiones a partes del circuito. Pero los CPG combinan estabilidad y variabilidad, permitiendo la existencia de diversos patrones estables generados por el mismo circuito. Diversos neuromoduladores y la actividad de neuronas adyacentes al CPG son capaces de provocar cambios de patrones, actuando como selectores de atractores de acuerdo a las necesidades motoras del organismo. Además, a pesar de que los CPG de dos organismos de la misma especie generen patrones similares, sus circuitos suelen ser diferentes. Así pues, diferentes circuitos pueden generar los mismos patrones, y el mismo circuito puede generar diferentes patrones estables; una característica común de los sistemas autoorganizados [14].

5. La aparición de la causalidad informacional en el SN

Con lo que venimos diciendo hasta ahora podemos ya ver que los potenciales de acción (y algunos neuromoduladores) y, sobre todo, los patrones de orden superior que generan al autoorganizarse constituyen un nuevo tipo de observables específicamente neuronales. Cuando se constituye una red formada por varias neuronas en funcionamiento, podemos describir su dinámica a través de esos observables. Mientras consideremos a esta red neuronal como un sistema aislado (por ejemplo, si analizamos su comportamiento en una placa de Petri) tales

observables no constituyen sino una forma útil de describir de manera abreviada una mucho más compleja dinámica metabólica subyacente. Pero en el marco de la actividad vital de un organismo situado en un entorno, estos observables neuronales, como hemos visto, generan un nuevo nivel dinámico de carácter funcional. Como vamos a ver, este nuevo nivel tiene dos características especiales:

1. La característica de todo o nada de los impulsos nerviosos permite una combinabilidad estable de los mismos, que unida a las características de red de la matriz de conectividad y la acción de los neuromoduladores, genera un dominio composicional (los impulsos pueden organizarse secuencialmente en el tiempo), recurrente (la estructura de red permite circularidad) y recursivo (los impulsos operan sobre sí mismos a través de los neuromoduladores que activan⁴). A su vez estos observables pueden autoorganizarse en patrones estables y generar dominios composicionales a niveles superiores.
2. La propiedad fundamental de los observables neuronales es su *potencialidad* para una *causalidad formal* (e.d., que la acción causal está ligada a la estructura de las configuraciones y no a elementos energéticos y temporales) desligada de la causalidad energéticamente determinada sobre la que se propagan esas mismas señales. Del mismo modo que, por ejemplo, los impulsos eléctricos que viajan en los cables de redes informáticas pueden causar cambios en las terminales no en virtud de la energía eléctrica que llevan, sino de la secuencia de cambios de amplitud y frecuencia, la causalidad motora de los impulsos nerviosos no viene determinada por la energía electroquímica que constituye los potenciales de acción, sino por la *forma* en que las células musculares “interpretan” los neurotransmisores segregados por las neuronas y movilizan la energía metabólica para producir movimiento. Respecto a la percepción, la peculiaridad de los observables neuronales es que sus efectos causales son definidos por la propia dinámica neuronal que proyecta sobre la percepción una serie de constricciones selectivas de acuerdo a lo que desde un nivel psicológico se describen como estados de atención, anticipación de sentido, etc.

La constitución del SN como un dominio autónomo, jerárquicamente desacoplado, constituido por una dinámica recurrente en constante autoorganización y con capacidad para una causalidad formal, nos acerca irremediamente al concepto de información. Sin embargo, nos queda por especificar qué es lo que añade el concepto de información a lo que venimos explicando. El factor clave va a ser la asignación de contenido (perceptivo o instructivo).

Para evitar caer en las paradojas homunculares y externalistas de un concepto de información no naturalizado, debemos evitar la tentación de recurrir a las metáforas derivadas de las tecnologías de la computación y la comunicación

⁴ Por eso, la diferencia fundamental entre los observables del SN y otro tipo de señales, como las hormonas (moléculas que vehiculizan formas de coordinación intercelular) además de una muchísima mayor rapidez de transmisión, es la capacidad de “procesamiento” recursivo (señales operando sobre señales) y que confiere al SN un carácter “cuasi-sintáctico” en relación a la dinámica de los procesos metabólicos.

más allá de lo estrictamente necesario y naturalizable. El punto de unión es, sin duda, la posibilidad de una causalidad formal. Sin embargo la causalidad informacional en las tecnologías de la comunicación depende siempre de un sistema cognitivo natural que interpreta las señales. Se trata (en nuestro caso, el de la caracterización del concepto de información en el SN) de explicar precisamente el funcionamiento de este último, e.d. de parar la regresión al infinito de sujetos interpretantes (en forma de homunculos cerebrales) que justifique dicha causalidad informacional, enraizándola en la propia organización dinámica de la actividad neuronal.

La única forma de conseguir que el concepto de información sea naturalizado es (siguiendo a Bickhard [15]) buscando una noción de información (aunque este autor hablará de representación) que permita detección del error por parte del sistema que maneja la información, lo que a su vez exigirá naturalizar la noción de normatividad, de tal modo que ésta sea accesible para el organismo mismo. La normatividad se convierte así en el principio en virtud del cual se establece *la evaluación del error* como proceso *causalmente* efectivo en el mantenimiento de la identidad del sistema. De este modo un concepto naturalizado de información pasa por comprender el origen de los valores regulativos de un organismo. Sólo en el contexto de la interacción biológica sistema-entorno, en el que se generan los valores regulatorios de la agencialidad a través de los procesos autoorganizativos de selección de señales, puede comprenderse el concepto de información en los sistemas cognitivos naturales. Los procesos informacionales en el SN no son meras correlaciones con estados de cosas en el mundo, ni son meras constricciones impuestas sobre los procesos autoorganizativos.

Nos encontramos por tanto con que los factores clave para una noción naturalizada de información en el SN vienen de la mano de cómo se integra la información causalmente en la organización del SN (en relación a su creación y su capacidad de constricción de la dinámica neuronal) y cómo adquieren estos procesos un contenido semántico (referencial) en relación a una normatividad internamente generada por el sistema (y que permita, por tanto, la corrección de error). Veamos cómo podemos reconstruir una noción de información que satisfaga estas condiciones desde la perspectiva dinámica y naturalizada que venimos defendiendo.

En primer lugar, podemos diferenciar dos aspectos del contenido informacional. El primero es el instructivo (un aspecto que comparte con la información genética): decimos que el contenido informacional de una estructura o proceso es instructivo si este proceso es capaz de desencadenar-instruir sistemáticamente y en virtud de su “forma” una serie de procesos funcionales (en última instancia, fuera del SN: acciones musculares o secretoras). Es fácil reconocer este aspecto informacional de la dinámica neuronal, por ejemplo, en las señales que hacen cambiar o que desatan un patrón dinámico específico de un CPG y el consiguiente desencadenamiento de una acción motora. De este modo, en el marco conceptual dinámico, *la información son patrones de señales que actúan como parámetros de control de otros procesos autoorganizados*. En este sentido, la dinámica informacional del SN puede ser entendida *como el conjunto de procesos que gobiernan*

los cambios de macroestados generados por los procesos autoorganizativos, y que hacen que el resultado sean acciones evaluables funcionalmente por el organismo.

Sin embargo, hay otro aspecto más en la información neuronal. Se trata de la dimensión perceptiva de la información. Entendemos por ello que los procesos neuronales están organizados en relación a las interacciones con el entorno en virtud de un contenido intencional o semántico de dichos procesos. Es decir, que la organización informacional del SN no es un conjunto de “instrucciones” motoras aisladas de las interacciones que el sistema establece con su entorno, sino que están vinculadas con los ciclos sensomotores y, sobre todo, con la necesidad de adaptar las respuestas motoras a condiciones específicas del entorno.

Tentativamente podemos ofrecer la siguiente definición de información perceptiva en términos dinámicos:

Un patrón de señales (**P**) se convierte en informacional dentro de un sistema (**S**) acerca de un estado de cosas **E** ssi: **S** selecciona recurrentemente **P**, y **P** es esencial para el automantenimiento de **S** a través de la ocurrencia de **E**.

Donde el sistema **S** es una estructura automantenida de orden superior a **P**. **S** puede ser un patrón autoorganizado de señales, el SN en su conjunto, todo el organismo e incluso la especie como estructura colectiva (por lo que la selección de **P** puede ocurrir a diferentes escalas locales y globales dentro del SN, en la ontogenia del organismo o a escala evolutiva).

Veamos un ejemplo concreto que ilustre esta definición de información: Una señal lleva información acerca de la presencia de comida para un organismo ssi: las acciones que desencadena esa señal en el organismo contribuyen a su automantenimiento *a través de* la presencia de la comida. Esto permite que la información pueda ser falsa, ya que puede darse el caso de que algo que no es comida desencadene esa señal, que a su vez desencadena la consiguiente interacción cuyo resultado *no* contribuye al automantenimiento del sistema (a través de la presencia de la comida). Además puede darse detección de error si el resultado de la interacción es accesible al organismo, y corrección de error si existen mecanismos de modulación de la conducta en base a la detección del error. Este ejemplo ilustra la forma en que podemos hablar de información perceptiva en un organismo sin caer en la falacia del homúnculo, e.d. sin hacer una descripción de correlaciones estímulo-impulso que desplace (indefinidamente) el problema del significado a un sistema que a su vez tenga que *interpretar* el impulso.

La definición que acabamos de presentar permite hablar de procesos neuronales que operan efectivamente como una causalidad específica (la informacional) para el organismo (ya que éste es capaz de evaluar el contenido semántico del proceso informacional) y no desde la perspectiva de un observador externo que establece el vínculo (en forma de correlación causal o de cualquier otro modo) entre señal y contenido informacional.

A partir de aquí, podremos decir que se crea nueva información neuronal cuando se fija una relación funcional que no existía anteriormente. La información neuronal se puede construir pues de dos formas diferentes en virtud de la relación entre los aspectos instructivos y perceptivos de la información: *a)*

Información meramente instructiva (secreto-motora): se genera a través de procesos autoorganizativos que se realizan a partir de estructuras genéticamente especificadas. Esta modalidad incluye también lo que podríamos llamar “información sensomotriz básica”, que aparece en los actos reflejos, cuando (a raíz de una señal perceptiva) se genera una trayectoria sensomotriz genéticamente especificada, (por lo que el aspecto perceptivo y el instructivo son indisociables). *b) Información perceptiva*: es aquella en la que los aspectos perceptivos se pueden desligar de los instructivos. La información perceptiva se genera cuando se fija una relación que no existía anteriormente entre procesos informacionales instructivos y perceptivos. Podemos hablar de dos aspectos organizativamente diferenciados de la información neuronal (el perceptivo y el instructivo) porque a diferencia de las trayectorias sensomotoras innatas, los procesos de aprendizaje permiten combinaciones variables de información instructiva y perceptiva.

6. Aprendizaje y desarrollo: la creación de información en el sistema nervioso

A diferencia de la información genética en la ontogenia del organismo, la información neuronal es constantemente creada en el SN, y es precisamente esa creación de información a través de la interacción del organismo con su entorno la que va a permitir la progresiva “autodeterminación” del SN. La creación de información es necesaria porque no puede estar genéticamente especificada. La creación de información *a través de procesos autoorganizados* es una tarea permanente del SN⁵. Esto se debe a que la información necesaria para especificar circuitos neuronales sobrepasa enormemente la capacidad del código genético. En el caso del ser humano si los circuitos neuronales estuvieran genéticamente preespecificados eso significaría que 10^6 genes (de los cuales sólo un 20-30% participan en la construcción del SN) tendrían que almacenar la información suficiente para codificar 10^{14} sinápsis que, a su vez, pueden tomar valores cuantitativos de un espectro considerablemente amplio. Esa reducción de variabilidad (del conjunto de parámetros y conexiones posibles a las que resultan funcionales para el organismo) sólo puede darse a través de procesos autoorganizativos que seleccionen y establezcan configuraciones específicas, e.d. a través de la generación de información durante la ontogenia del organismo.

El concepto de información que venimos defendiendo es indisociable de una dinámica funcional de prueba y error, en la que se generan y destruyen correlaciones funcionales. Aquí es donde la introducción de una dimensión dinámica (la autoorganizativa) resulta, paradójicamente, fundamental, para construir un

⁵ A diferencia de la información genética, la información neuronal es generada en tiempo somático. No hay información neuronal genéticamente definida porque la información neuronal se construye en el ámbito del SN. La información genética (vía procesos de desarrollo) especifica los mecanismos (entre ellos la arquitectura básica del SN) que van a permitir a su vez la creación de información neuronal (y, naturalmente, la construcción del organismo como sistema metabólico).

concepto naturalizado de información neuronal. Aparte de las dinámicas sensoromotoras más simples, que están genéticamente determinadas, toda funcionalidad interactiva nueva surge como resultado de la interacción recurrente y en red (autoorganizada) de todo un conjunto de neuronas, sin que exista un recorrido sensoriomotor lineal y unidireccional que determine la conducta del organismo. Desde esta perspectiva la estimulación perceptiva aparece como un conjunto indefinido de perturbaciones (trenes de impulsos) en el estado dinámico de la red neuronal. Algunos de estos trenes de impulsos son seleccionadas o reclutados por otro patrón interactivo de orden superior. La estimulación perceptiva es, pues, modulada desde dentro: ciclos sensoriomotores, internamente generados y regulados, estabilizan un patrón sensorial para integrarlo en el ciclo sensoriomotor. A su vez, nuevos patrones motores (a través de estructuras CPG) son generados para mantener una serie de invariantes internas. Estos patrones se estabilizan (se seleccionan o activan) en forma de atractores, resonancias, etc. cuando contribuyen al automantenimiento del sistema. También puede suceder que, como resultado de ciclos acción-percepción-acción, el patrón global neurodinámico cambie y el organismo adopte otro tipo de interacción con el entorno. La corporización interactiva del SN hace que este proceso de mantenimiento de invariantes se cierre en ciclos sensoriomotores con el entorno integrándolos funcionalmente para el mantenimiento de los patrones globales. En una escala de complejidad aún mayor encontramos que la propia dinámica de la red genera procesos de aprendizaje. La forma más básica de los procesos de aprendizaje funcional es la del reforzamiento de las conexiones que han dado lugar a una conducta de valor positivo para el organismo. En este mecanismo son fundamentales los procesos de activación de los neuromoduladores que actúan fijando las rutas funcionales de impulsos, generando así un proceso de *selección* interna [16]⁶.

7. Conclusiones

A partir de una semántica o referencialidad corporizada en las necesidades adaptativas del organismo y guiada por señales de valor evolutivamente fijadas, va generándose toda una red de procesos autoorganizados en la que unos niveles van seleccionando procesos de niveles inferiores en una jerarquía anillada de procesos informacionales. De este modo los grados de libertad de un sistema (el SN) capaz de un inmenso número de transformaciones de estado (a través de una enorme variabilidad recurrente entre diversos tipos de observables) se van organizando informacionalmente a lo largo del desarrollo ontogenético. Los procesos de aprendizaje, sostenidos sobre la normatividad básica de automantenimiento del organismo, van estabilizando una serie de relaciones perceptivas que, a su vez, estabilizan otros procesos de órdenes superiores, creando una red de relaciones perceptivas siempre revisables, ya que su estabilidad depende de la satisfacción de ciertas correlaciones sensoriomotoras acopladas al entorno. La

⁶ La forma general de este proceso es que los neuromoduladores extrínsecos (como la dopamina) regulan la estabilidad de aquellos circuitos (o matrices de conectividad) que generan procesos interactivos de valor adaptativo.

organización informacional cognitiva es, pues, aquella en la que los procesos neuronales se instruyen a través de señales seleccionadas recursivamente mediante su inserción en ciclos sensomotores que dependen de estructuras específicas del entorno (y generando nuevas relaciones perceptivas con el mismo). Sólo así podremos naturalizar el concepto de información en el desarrollo científico de las neurociencias cognitivas. De otro modo el uso heredado de este concepto (proveniente de la tradición de IA clásica) se enfrenta a una serie de problemas que hacen desaparecer, precisamente, aquellas propiedades (intencionales y semánticas) que hace del cerebro uno de los sistemas más complejos y fascinantes de nuestro universo.

Referencias

1. Adrian, E. D. *The basis of sensation; the action of the sense organs*. 1st.edition Christophers London. reprint Hafner N.Y. (1928:1964)
2. Dayan, P y Abbott, L. F. *Theoretical Neuroscience*. MIT Press, Cambridge, MA. (2001)
3. Rieke, F., Warland, D., van Steveninck, R. y Bialek, W. *Spikes. Exploring the Neural Code*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts. (1997)
4. Ruiz-Mirazo, K and Moreno, A. Searching for the roots of autonomy: The natural and artificial paradigms revisited. *Communication and Cognition-Artificial Intelligence*, **17**(3-4): 209-228. (2000)
5. Arhem, P. y Liljenstrom, H. On the Coevolution of Cognition and Consciousness. *Journal of Theoretical Biology*, **187**: 601-612. (1997)
6. Moreno, A. y Lasa, A. From Basic Adaptivity to Early Mind *Evolution and Cognition* **9**(1): 12-30 (2003)
7. Ashby, W. *Design for a Brain. The origin of adaptive behaviour*. Chapman and Hall, 1978 edition. (1952)
8. Bechtel, W. y Richardson, R. *Discovering Complexity. Decomposition and Localization as strategies in scientific research*. Princeton University Press. (1993)
9. Steels, L. Towards a theory of emergent functionality. En Meyer, J. Wilson, R. (eds.) *Simulation of Adaptive Behavior*. MIT Press, Cambridge MA, pp. 451-461. (1991)
10. Varela, F., Lachaux, J.P., Rodriguez, E. and Marinerie, J.: The Brain Web: Phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience* (2001) **2**: 229-239.
11. Friston, K.J.: The labile brain (I, II and III). *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* (2000) **355**: 215-265.
12. Tononi, G, Edelman, G.M. and Sporns, O.: Complexity and coherency: integrating information in the brain. *Trends in Cognitive Science* (1998) **2** (12): 474-484.
13. Arshavsky, Y., Deliagina, T. y Orlovsky, G. Pattern Generation. *Current Opinion in Neurobiology*, **7**: 781-789. (1997)
14. Kelso, J.S.A. *Dynamic Patterns. The Self-Organization of Brain and Behavior*. MIT Press, Cambridge, MA. (1995)
15. Bickhard, M. H. Information and Representation in Autonomous Agents. *Journal of Cognitive Systems Research*, **1**(2), (2000)
16. Edelman, G.M. *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection*. Basic Books. (1987)