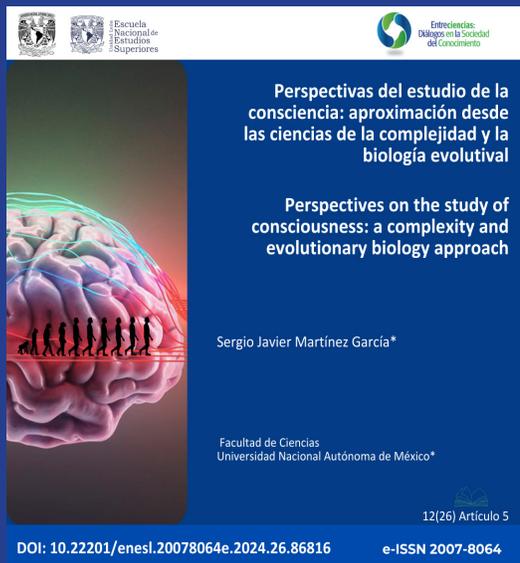




Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento

Año 12, Número 26, Artículo 5: 1-17. Enero - Diciembre 2024
e-ISSN: 2007-8064



Perspectivas del estudio de la consciencia: aproximación desde las ciencias de la complejidad y la biología evolutiva

Perspectives on the study of consciousness: a complexity and evolutionary biology approach

DOI: 10.22201/enesl.20078064e.2024.26.86816
e25.86816

Sergio Javier Martínez García^{a*}
<https://orcid.org/0009-0005-0126-1514>

Fecha de recepción: 1 de octubre de 2023.
Fecha de aceptación: 12 de febrero de 2024.
Fecha de publicación: 4 de marzo de 2024.

^a Autor de correspondencia
sjmkg@comunidad.unam.mx

*Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.
CC-BY-NC-ND



RESUMEN

Objetivo: presentar los avances y problemas vigentes del estudio de la consciencia con el fin de discutir las ventajas de un programa de investigación centrado en ella, definido por la biología evolutiva y las ciencias de la complejidad.

Diseño metodológico: se realizó una revisión de la literatura científica de los estudios de la consciencia. La revisión se centró en mostrar los hallazgos y limitaciones conceptuales y metodológicas. Posterior a eso, se realizó un análisis de los métodos de las ciencias de la complejidad y la biología evolutiva para discutir sus alcances en el estudio de la consciencia.

Resultados: se presenta el desarrollo comparativo de diferentes teorías actuales sobre la consciencia, entre ellas: la Teoría de la integración de la información y la Teoría del área de trabajo global. También se presenta un esquema de trabajo con los métodos de las ciencias de la complejidad y se sugiere a la biología evolutiva como un marco para la interpretación de los resultados.

Limitaciones de la investigación: la falta de consenso en la definición dificulta la integración de los datos empíricos en una teoría general de la consciencia.

Hallazgos: se argumenta a favor de seis puntos necesarios para el programa de investigación de la biología evolutiva y de la complejidad. Los puntos son: el análisis funcional adaptativo de la consciencia, la emergencia de estructuras modulares, las novedades evolutivas, la correspondencia genética de las capacidades cognitivas, el efecto del medio y la causalidad recíproca.

Palabras clave: complejidad, consciencia, biología evolutiva, qualia.

ABSTRACT

Purpose: To review the current advances and current of the study of consciousness in order to discuss the advantages of a research program on consciousness defined by biology and complexity sciences.

Methodological design: A review of the scientific literature of consciousness showed conceptual and methodological findings and their limitations. An analysis of the methods of complexity sciences and biology was carried out to discuss how this approach is able to contribute to the study of consciousness.

Results: Among the comparative development of different current theories on consciousness we have the Theory of the integration of information and the Theory of the global work area. We also present a working scheme with the methods of complexity sciences and suggest evolutionary biology as a framework for the interpretation of the results.

Research limitations: A lack of consensus on definition makes it difficult to integrate empirical data into a general theory of consciousness.

Findings: Six points were discussed as necessary for the research program of evolutionary biology and complexity, such as: the adaptive functional analysis of consciousness, the emergence of modular structures, evolutionary novelties, the genetic correspondence of cognitive abilities, the effect of the environment and reciprocal causality.

Keywords: complexity, consciousness, evolutionary biology, qualia.

INTRODUCCIÓN

Una dificultad del estudio de la consciencia es la diversidad de connotaciones que sostienen las distintas perspectivas del problema. Una de las más discutidas es la realizada por Chalmers, quien separa el problema en lo fácil y lo difícil, con base en la accesibilidad del pensamiento reduccionista y mecanicista, siendo lo fácil lo accesible y lo difícil lo inaccesible (Chalmers, 2007). Este discurso generó diversos programas de investigación en la búsqueda de los elementos físicos capaces de presentar una experiencia (Fekete, van Leeuwen y Edelman, 2016; Jylkka y Railo, 2019). Dichos programas se enfocaron en la búsqueda de correlatos neuronales, la existencia de estados mentales, la diferenciación de estímulos, isomorfismos, las propiedades de la consciencia y las características que debe presentar una entidad consciente (Gamez, 2014; Schlicht, 2018; Seth, 2018). Sin embargo, la visión a favor del problema difícil sostiene que dichos programas sólo abordan la parte fácil. Esto genera la duda de si la distinción existe o no y, de existir, qué marco y qué métodos son los apropiados para abordar este problema.

Se argumenta que un enfoque físico y biológico es el adecuado para el estudio de la consciencia con base en que ésta es una propiedad de los seres vivos, quienes se rigen por los principios de la física (Feinberg y Mallatt, 2016b; Jylkka y Railo, 2019; Minot, 1902). Esta afirmación, aunque ha sido aceptada, no es el eje que dirige la investigación científica sobre la consciencia; la cual presenta un sesgo antropocéntrico y neurocentrista. Este sesgo puede ser evitado con una perspectiva biológica al tratar los puntos que comúnmente se omiten en los modelos. Los puntos de mayor interés desde una perspectiva biológica son: la funcionalidad adaptativa de la consciencia, los mecanismos causales neuronales y fisiológicos, la ontogenia y la filogenia (Earl, 2014; Feinberg y Mallatt, 2016b; Gutfreund, 2018; Hoffman, 2018). La mayoría de dichos estudios están disgregados, lo que dificulta la integración en modelos.

A pesar del interés en la consciencia no hay un consenso respecto de qué debe incluir un esquema de estudio biológico adecuado. En esta reflexión teórica se propone que la biología evolutiva y las ciencias de la complejidad generan dicho marco. Esto ayudará a definir un campo

dando pie a un esquema metodológico y conceptual para abordar los problemas de la consciencia (Klein y Barron, 2020; Solms, 2018). Este marco debe incluir las siguientes dimensiones: fenomenológica, ambiental, fisiológica, funcional y evolutiva. Lo anterior es para entender a la consciencia y generar un modelo explicativo más completo (Jonkisz, Wierzchoń, y Binder, 2017; Singer, 2019).

El objetivo es presentar los avances y problemas vigentes del estudio de la consciencia con el fin de discutir las ventajas de un programa de investigación centrado en ella, definido por la biología evolutiva y las ciencias de la complejidad. Para cumplir el objetivo se realizó una revisión extensa de la literatura científica de los estudios de la consciencia desde sus primeras menciones hasta los trabajos más recientes. La revisión se centró en mostrar los hallazgos, las limitaciones conceptuales y las metodológicas. Posterior a eso, se realizó un análisis de los métodos de las ciencias de la complejidad y la biología evolutiva para discutir sus alcances en el estudio de la consciencia.

En la primera parte del artículo se describe el panorama general del problema y del concepto de la consciencia. En la segunda parte, se discuten modelos que abordan distintos aspectos de estos problemas. Por último, en la tercera parte se propone a la biología evolutiva y la complejidad para generar un programa de investigación dedicado al estudio de la consciencia y atacar los puntos que se escapan de los modelos existentes.

DESGLOSANDO EL PROBLEMA

El concepto de consciencia continúa en construcción, desde distintos enfoques metodológicos y conceptuales. La investigación está alrededor de lo que es una experiencia, generando una definición simplista en términos de “todo lo que se experimenta” (Tononi, 2004; Zhao, Zhu, Tang, Xie *et al.*, 2019). Esta definición ha ayudado a discriminar entre la experiencia y qué conlleva la consciencia. De esta manera se ha identificado que la experiencia es un problema modal y de primera persona, es decir, que tiene modalidades y contenidos. Esto supone un problema metodológico en acceder a la experiencia

de primera persona a partir de métodos realizados en tercera persona y un problema conceptual en definir ¿cuáles son los mecanismos y la función de la consciencia? (Verschure, 2016; Zhao *et al.*, 2019). Estos planteamientos abordan distintas perspectivas metodológicas y filosóficas, desde donde se ha ido construyendo el concepto.

El dualismo cartesiano acuñado por Descartes es una de las primeras maneras de pensamiento utilizadas en el estudio de la consciencia. Éste postula que hay dos naturalezas en el universo: una física y otra metafísica, lo que implica una distinción entre la mente y el cuerpo. El problema de esta postura es que no hay una base empírica para observar la existencia de ambas naturalezas ni cómo se relacionan (Frith y Rees, 2007; Reggia, 2013). Como contraparte a esta postura está el monismo.

El monismo supone la existencia de sólo una naturaleza en el universo y que todo proviene del mismo punto de origen. Dentro del monismo se plantea una visión estructuralista de la consciencia, es decir, que la búsqueda de las estructuras y sus relaciones son las que nos darán el entendimiento de ella. Esta postura rige en mayor medida la parte reduccionista de la investigación científica, sin embargo, no es la única vertiente con la que cuenta (Frith y Rees, 2007; Jylkka y Railo, 2019; Minot, 1902; Reggia, 2013).

El estudio de la consciencia por el monismo tiene dos vertientes: la idealista y la materialista. El idealismo plantea que las estructuras causantes de la consciencia son mentales y que lo único real es la existencia propia. Esta postura no tiene aceptación debido a que no se puede acceder con métodos intervencionistas (Klein y Barron, 2020). Por otra parte, el materialismo tiene dos ejes de pensamiento científico: reduccionismo y funcionalismo. El reduccionismo secciona en partes a los problemas y supone que la suma de éstas es suficiente para alcanzar una explicación. Generalmente en esta postura la consciencia es la suma de los elementos neuronales. Por otra parte, el funcionalismo plantea los fenómenos como procesos; entonces, para entender a la consciencia es necesario estudiar el funcionamiento de los estados neuronales. Estas dos posturas son el eje principal de los programas de investigación y juntos conforman el pensamiento estructuralista sobre la investigación de la consciencia (Reggia, 2013).

El panorama científico de la consciencia identifica los problemas con base en un planteamiento estructuralista.

Estos han sido catalogados por Chalmers dentro del conjunto del “problema fácil”. Él refiere lo fácil en términos de lo que podemos estudiar por las técnicas utilizadas en física, biología y computación (Chalmers, 2007). Dentro de estos problemas se encuentran los mecanismos moleculares, celulares y fisiológicos que ocurren en el procesamiento de la información en el cerebro. Ejemplos de procesos estudiados con este enfoque son: el control del comportamiento, acceso a estados de memoria, integración de la información, reportabilidad, categorización y control de estímulos (Dennett, 2018; Reggia, 2013).

El “problema difícil” como lo concibe Chalmers se refiere a lo que no se puede acceder con los métodos convencionales de las ciencias naturales y se centra en la experiencia con la pregunta ¿cómo es que se siente algo? El problema reside en que conocer los mecanismos del procesamiento de la información no es suficiente para generar una experiencia subjetiva en primera persona (Chalmers, 2007; Dennett, 2018; Reggia, 2013). El discurso de la experiencia subjetiva se construyó en referencia a las sensaciones de los sabores, olores y colores; éstas son las características fenomenológicas de la consciencia y se nombran como *qualia* (Sturm, 2012).

El término *qualia* fue propuesto por Irving Lewis y se ha popularizado para referirse a las características fenomenológicas. Dado lo anterior, el problema difícil se ha parafraseado en función del *qualia*. Se supone que las sensaciones tienen una característica cualitativa, es decir, un estado específico para cada individuo. Por lo cual, la discusión se dirigió a un planteamiento dualista, que sugiere que la consciencia conlleva algo más allá de la estructura física (Loorits, 2014; Sturm, 2012).

La perspectiva dualista del problema difícil se ha intentado evitar sugiriendo que el *qualia* tiene una estructura definida por patrones neuronales, lo que hace accesible al reduccionismo y funcionalismo (Loorits, 2014). Esta postura tiene dos facetas: una epistemológica y otra semántica. La discusión epistemológica se cuestiona la validez de la afirmación de que las estructuras físicas son fenomenológicamente conscientes. La semántica se pregunta ¿cuáles son los elementos estructurales que debemos estudiar? Este planteamiento considera cuatro puntos: el del conocimiento, lo concebible, la multiplicidad y el de la explicación. El punto del conocimiento cuestiona los alcances de la física en el estudio de la consciencia, el de lo concebible el uso estricto de la ló-

gica sobre las aproximaciones experimentales, el de la multiplicidad la posibilidad de consciencia en agentes no biológicos y el de la explicación la suficiencia de los conocimientos estructuralistas para generar una experiencia en primera persona (Facco, Lucangeli, y Tressoldi, 2017; Sturm, 2012).

La perspectiva que niega el dualismo inherente del problema difícil supone que la consciencia es un sistema concreto que está situado en un campo espacio-tiempo. Se compone de elementos que constituyen un conjunto de cadenas que generan los patrones causales que desencadenan las experiencias. Una de las principales críticas, es que esta visión implica la posibilidad del pansiquismo, es decir, consciencia en todos los sistemas físicos (Lloyd, 2020). Como respuesta a lo anterior, la investigación se ha dirigido en la búsqueda de los patrones y la organización que debe tener un sistema para generar consciencia. Esto ha generado un fuerte interés en la investigación de las redes neuronales.

Con el advenimiento de las redes neuronales la pregunta que se plantea es ¿las redes neuronales son fenomenológicamente conscientes? La mayoría de las veces se responde con un sí negando el dualismo, argumentando que la distinción entre fácil y difícil no tiene sentido, ya que no se puede separar la consciencia de las redes neuronales (Cohen y Dennett, 2011; Polák y Marvan, 2018). De esta manera, se llegó a tener una sustancia de estudio definida en las redes neuronales y se acuñó el concepto de correlato neuronal de la consciencia (NCC, *neural correlates of consciousness*) (Polák y Marvan, 2018; Wiese, 2018).

El concepto de correlato neuronal de la consciencia se refiere “al conjunto mínimo de eventos neuronales que origina un aspecto específico de una percepción consciente” (Crick y Koch, 2003; Mashour y Hudetz, 2019; Polák y Marvan, 2018; Seth, 2018). Los NCC son los protagonistas de la mayoría de los programas de investigación actuales de la consciencia. El centro de la investigación está en la exploración de las propiedades del procesamiento, la integración de la información, el ensamblaje neuronal, los mecanismos celulares y moleculares de las neuronas (Kitchener y Hales, 2022; Rolls, 2020). Gran parte de estos esfuerzos se han dirigido a la búsqueda de una firma o señal que permita discernir entre una red neuronal consciente y una que no lo es. Con estudios de imagenología y electroencefalogramas se ha encontrado

que hay una configuración especial de las células que se pueden identificar como una firma para una experiencia en primera persona (Kitchener y Hales, 2022; Reggia, 2013; Rolls, 2020).

La búsqueda de patrones neuronales se ha realizado principalmente en humanos con electroencefalogramas e imagenología para definir las regiones anatómicas que participan en la generación de experiencias de primera persona. Se ha encontrado que la región talamocortical es la que presenta más correlaciones y que funciona como un área de excitación para la corteza (Modolo, Hassan, Wendling, & Benquet, 2020; Reggia, 2013; Ruiz de Miras, Soler, Iglesias-Parro, Ibáñez Molina *et al.*, 2019). Evidencia actual sugiere al tálamo, *claustrum*, el sistema de atención formado por la región fronto-parietal y el sistema formado por la zona cortical posterior, la unión parietal, occipital y los lóbulos temporales como los principales candidatos para los NCC en humanos. Los hallazgos muestran que las redes neuronales de estas zonas presentan alta recursividad y se activan con las experiencias en primera persona. Esto da la impresión de los correlatos neuronales de la consciencia (Kandel, 2021; Rolls, 2020).

Los NCC plantean al problema difícil en términos de si el correlato existe y entonces, el problema es real o si no hay correlación porque la percepción y las redes neuronales son la misma entidad. De un lado se argumenta que no hay evidencia que muestre una disgregación entre NCC y *qualia*; por lo cual se deben considerar como lo mismo. Por otra parte, se argumenta que las redes neuronales de forma independiente no generan *qualia* (Cohen y Dennett, 2011; Polák y Marvan, 2018, 2019; Sturm, 2012). Esta discusión se aborda a partir de la reducción de los mecanismos neuronales, lo que ha generado una clasificación de ellos.

En este punto hay una reducción de la consciencia. Ésta se reduce en dos: la parte fenomenológica y la parte de acceso. La consciencia fenomenológica se refiere a la generación de la experiencia subjetiva, es decir, del *qualia*. Mientras que la de acceso se enfoca en estudiar los correlatos neuronales de las vías de procesamiento e integración de la información y de procesos como: la atención de estímulos, acceso a la memoria y toma de decisiones (Maier y Tsuchiya, 2021; Reggia, 2013). Estos estudios han sugerido que puede haber procesamiento de estímulos y mecanismos de atención sin la forma-

ción de experiencias (Maier y Tsuchiya, 2021). Esto da un nuevo panorama al problema difícil de descifrar qué características debe tener una red neuronal para generar una experiencia y ¿qué podríamos estar omitiendo?

El campo de estudio está dispersado en argumentos a favor de la búsqueda de ingredientes estructurales faltantes, de una interpretación errada de los datos y de la imposibilidad de resolver el problema difícil. La manera en que se están atacando estos puntos consiste en integrar la experiencia en flujos de acceso a memoria y de estímulos. En este sentido la consciencia se supone como una entidad continua y dinámica (Kent y Wittmann, 2021). Además, se sugiere que la consciencia no se puede explicar por la suficiencia de los correlatos neuronales, sino que hay que explorar los mecanismos de integración, las funciones de entrada y de salida de las redes (Usher, 2021). Esto ha generado un campo para la matemática en el estudio de la consciencia.

La interpretación se ha ayudado de la modelación e integración de los datos empíricos. Uno de los intentos más prominentes es la propuesta matemática fenomenológica de la consciencia. Esta propuesta acepta la existencia de constituyentes físicos causales, ordenados en jerarquía. Propone a la consciencia como un sistema dinámico con puntos de estabilidad, autosensibles entre ellos y con un alto grado de recursividad. La interacción entre estos puntos de estabilidad es lo que constituye la consciencia (Barnden, 2020). Sin embargo, al igual que muchos intentos de modelación, se queda en un planteamiento debido a la cantidad de variables, control y el manejo matemático que requieren las pruebas empíricas (Wallace, 2021), dejando el campo abierto a la búsqueda de nuevos ingredientes.

La visión naturalista argumenta que el problema difícil no puede ser resuelto por sólo considerar la impresión neuronal de la cognición. Junto con los aspectos neuronales es necesario tomar en cuenta la dimensión evolutiva y cultural, bajo el supuesto de que la consciencia es un fenómeno que se está construyendo en cada individuo (Singer, 2019). Además, la dimensión biológica propone una discusión en términos funcionales preguntando si la consciencia es teleológica. Este argumento se justifica en si la evolución del cerebro va encaminada a resolver problemas con base en aprendizaje y susceptibilidad a los estímulos ambientales (Feinberg y Mallatt, 2016a, 2016b; Pennartz, 2022; Pennartz, Farisco y Evers, 2019).

Esto concuerda con un estudio *in silico* que muestra una posible dirección adaptativa de la consciencia (Hoffman, 2018).

Otro enfoque sugiere la necesidad de una explicación cuántica. En esta perspectiva, la interacción de las partículas elementales, explicado por isomorfismos genera un estado de consciencia cuando alcanza cierto nivel de organización con estructuras específicas (Facco *et al.*, 2017; Guevara, Mateos, y Pérez Velázquez, 2020; Laszlo, 1997; Penrose, 2012; Torday, 2018). Se plantea que las células tienen un lenguaje y que ahí está la clave para entender la formación de las experiencias subjetivas (Penrose, 2012; Ji, 2017). Esta postura cuenta con evidencia empírica de una codificación molecular de interacciones celulares (Ji, 2017). Sin embargo, no ha sido explorada por el grado de abstracción y la dificultad de diseñar experimentos para ponerla a prueba.

Los enfoques mencionados han sugerido una serie de definiciones, principios, propiedades e hipótesis de la consciencia. Esta serie de planteamientos se enfoca en las características fenomenológicas y encuentra su utilidad en el desarrollo de los programas de investigación y la evasión del pansiquismo. Las hipótesis actuales de la consciencia son: 1) la suficiencia de los mecanismos neurofisiológicos para explicar la experiencia subjetiva. 2) Los aspectos cuánticos de las interacciones de la información y de las células. 3) La posibilidad de una graduación en la consciencia como emergencia de los niveles de organización de la materia (Facco *et al.*, 2017).

Para entender estas hipótesis es necesario contextualizarlas en tres dimensiones conceptuales: el objetivo, el alcance explicativo y la necesidad. El objetivo se refiere a qué característica de la consciencia se está abordando; por ejemplo, los mecanismos de integración de la información, las características fenomenológicas, etcétera. El alcance explicativo concibe la relación de suma e integración de los elementos que se están estudiando. Por último, la necesidad justifica la relación explicativa y la funcionalidad de dicha explicación en el panorama del estudio (Niikawa, Miyahara, Hamada y Nishida, 2022).

Para evitar la ambigüedad de las hipótesis y el pansiquismo se han propuesto ciertas propiedades intrínsecas de los sistemas conscientes. Se define a la consciencia como la propiedad de organizar las interacciones causales entre un agente y su entorno. Con esta definición se plantea ésta en términos de la interacción y reacción

de un agente con el medio externo (Manzotti y Jeschke, 2016). Entonces los sistemas conscientes presentan aclimatación en su comportamiento, discriminación, anticipación, reconocimiento del medio externo, de lo propio y toma de decisiones. Estos puntos se encuentran relacionados a regiones anatómicas donde se han observado los correlatos neuronales y de esta manera se pueden definir las características estructurales (Mallatt, Blatt, Draguhn, Robinson *et al.*, 2021; Ponte, Chiandetti, Edelman, Imperadore *et al.*, 2022; Tyler, 2020).

Las características estructurales de la consciencia son: 1) privación de la experiencia en primera persona a un sujeto en tercera persona. 2) Unicidad de las sensaciones, es decir, que no se experimentan los estímulos por separado sino en unidad. 3) Operacionalidad, dada en términos de la realización de estructuras lógicas detectables por métodos de electroencefalogramas. 4) Iteratividad y recursión de las redes neuronales que generan experiencia en primera persona. 5) Irreductibilidad, es decir, que la consciencia no se puede reducir en partes (Feinberg y Mallatt, 2016a; Tyler, 2020).

La mayoría de la investigación realizada tiene una vertiente reduccionista, sin embargo, parece haber una contradicción con una de las propiedades propuestas de la consciencia, su naturaleza irreductible. Debido a esto es que se ha sugerido que el reduccionismo podría ser lo que está generando la falta de entendimiento y la carencia de una explicación concreta de la consciencia (Bridewell y Isaac, 2021). En este punto, una de las estrategias que podemos utilizar es cambiar de perspectiva hacia las ciencias de la complejidad. A continuación, se describirán los modelos de la consciencia con el fin de generar un esquema donde se pueda integrar la complejidad.

ATACANDO EL PROBLEMA

Para dar una explicación de la generación de la consciencia se han formulado diversos modelos atacando distintas propiedades y mecanismos; con el fin de abatir al problema difícil. En esta sección se discutirán los más relevantes como el modelo de integración de la información, el de área de trabajo global y el de pensamiento de alto orden. Cabe mencionar que estos modelos están

construidos en función del concepto de correlato neuronal de la consciencia.

Un intento pionero es el “Modelo Modular de la Consciencia”. Este modelo considera que las redes neuronales son el mecanismo causal para generar consciencia y se puede describir matemáticamente. Este enfoque considera tres niveles: el fenomenológico, el acceso a memoria y el neuronal. Propone la existencia de tres módulos. El primero es una interfaz de entrada y realiza la clasificación, el segundo es un amortiguador en el cual se genera la experiencia y el tercero realiza una fase de retroalimentación. Este modelo plantea que la interfaz de entrada es indispensable por la codificación de la información. Esto permite la entrada al segundo módulo, que es un área de competencia global; donde hay conectividad recíproca (Taylor, 1997).

La evidencia empírica que sustenta este modelo es la relación de la región frontal de la corteza con la posible clasificación de los estímulos y el acceso a la memoria (Sergent y Dehaene, 2004). Se propone que la región frontal de la corteza funciona como el módulo dos y que recibe los estímulos de entrada, los cuales fueron previamente clasificados desde el tálamo. Con esta evidencia se llegó al planteamiento de las siguientes preguntas: ¿Cómo se integra la información de entrada y la de memoria? ¿Cómo se hace la transformación de la información entre módulos? ¿Existen diferencias entre la transformación de la información de los pensamientos y de las sensaciones? (Taylor, 1997). Las preguntas que surgieron con este modelo dieron pie al planteamiento de modelos como el de la integración de la información, el del área de trabajo global y el de alto orden de pensamiento.

El modelo de “Integración de la Información” plantea que la consciencia es la capacidad de un sistema de integrar información en una experiencia. Este modelo reduce a la consciencia en la integración y la diferenciación. La integración es la cantidad de irreductibilidad que presenta una red neuronal y la diferenciación es la clase de experiencia que se está formando. El nivel de consciencia está determinado por las relaciones de la información de los diferentes elementos; esto genera la información efectiva del sistema. Entonces cada experiencia particular es especificada por el valor dado de las variables y su interacción entre los elementos del sistema (Tononi, 2004; Tononi y Koch, 2015).

El modelo de integración de la información se sustenta en seis axiomas que se proponen para llevar lo teórico a una propuesta naturalista. 1) La existencia intrínseca de los sistemas conscientes. 2) La composición estructurada de los elementos de la consciencia. 3) La experiencia como consecuencia de un flujo particular de procesamiento de la información. 4) La diferenciación de estímulos en experiencias diferentes. 5) La integración de la información que genera lo irreductible del sistema y ocasiona la experiencia. 6) La consciencia ocurre en un campo espacio-tiempo de elementos neuronales (Bayne, 2018; Tononi y Koch, 2015). Además, este modelo contempla la causalidad mental como consecuencia de la funcionalidad de la consciencia, es decir, que tiene una finalidad. La naturaleza causal se observa en las propiedades irreductibles, sin embargo, estas pueden ser analizadas mediante los NCC (Owen, 2020).

Este modelo provee una manera de cuantificar la irreductibilidad, lo que se interpreta como la capacidad de integrar información de una red. Se ha sugerido que un valor de cero corresponde a un sistema reducible, lo que implica un sistema sin consciencia. Mientras que un valor mayor que cero indica cierto grado de consciencia (Jerath, Crawford, y Barnes, 2015; Tononi, 2004). Además, se ha mostrado que hay un abanico de diferenciación de las experiencias que depende de la cantidad de entropía de las redes integradas (Virmani y Nagaraj, 2019). Esto genera un potencial de las posibles respuestas a todas las perturbaciones presentadas en el sistema (Reggia, 2013; Tononi y Koch, 2015). A partir de esta cuantificación se intenta responder ¿Qué hace a un sistema capaz de poseer consciencia? Y ¿Qué clase de consciencia es la que presenta el sistema? (Tononi, 2004; Tononi y Koch, 2015)

Para responder ¿qué hace a un sistema capaz de ser consciente? Este modelo propone que la clasificación de la información y la reducción de las incertidumbres entre el número de alternativas es lo que proporciona la posibilidad de un sistema de ser consciente. Supone que en un sistema consciente hay interacciones causales recursivas entre los elementos que pueden ser medidas con entropía. Dado esto, debe ser posible clasificar e integrar la información en un complejo que generará consciencia (Tononi, 2004; Tononi y Koch, 2015).

Para responder la pregunta de las clases de consciencia se definen modalidades, submodalidades y dimensiones de los estímulos. Las modalidades se refieren a

lo sensorial como la visión, audición o dolor. Las submodalidades se refieren a los valores que puede tomar cada modalidad, por ejemplo, la existencia de color o la percepción de la luz; y las dimensiones son el posible valor de cada color. Entonces las diferentes clases de consciencia son las diferentes modalidades. (Tononi, 2004; Tononi y Koch, 2015). A partir de dichas modalidades este modelo aborda el *qualia*.

El modelo propone un espacio multidimensional de *qualia* codificado en una matriz de las relaciones entre los NCC. Se propone que la relación de la información entre elementos es lo que explica por qué diferentes áreas del cerebro correlacionan con experiencias específicas mientras que otras no tienen correlación. Lo anterior, se observa en la correlación con un estado de resonancia eléctrica entre las regiones que participan para dar la experiencia (Grossberg, 2017; Hunt y Schooler, 2019). Por ejemplo, las áreas corticales tienen correlatos con colores y al integrarse estas redes generan la experiencia, sugiriendo que la integración de la información en la región talamocortical genera la consciencia (Tononi, 2004; Tononi y Koch, 2015).

El espacio *qualia* se utiliza para cuantificar lo complicado de un pensamiento abstracto. Se plantea que en un pensamiento los elementos neuronales que lo generan tienen estados discretos y reglas de transición determinadas por la interacción entre ellos. Además, para cualquier conjunto de elementos en un estado de activación, la cantidad de irreductibilidad se evalúa en relación con los posibles estados pasados y futuros. Entonces, un estado de activación específico da lugar a una estructura conceptual. Esto sugiere que, dentro de un estado de consciencia dado, las estructuras conceptuales resultantes son máximamente irreductibles (*MICS maximally irreducible conceptual structure*) (Fekete *et al.*, 2016).

Este modelo propone que la MICS es igual al *qualia*, el cual es generado por un conjunto particular de correlatos neuronales del sistema talamocortical. Con el formalismo matemático de la teoría de categorías se propone que existe una función de conectividad para pasar del dominio irreductible de las redes neuronales a la experiencia en primera persona. Se propone que la MICS y *qualia* son categorías y que existe una función que relaciona ambos dominios. Este pensamiento provee una manera de análisis para las cuestiones fenomenológicas del estudio de la consciencia con base en

redefinir la experiencia en categorías con su correlato (Tsuchiya, Taguchi, y Saigo, 2016). El uso de la teoría de categorías hace posible realizar matemáticas axiomáticas para definir la fenomenología en términos de un sistema formal. De esta manera se pueden modelar las relaciones y composición de conjuntos de procesadores como estructuras matemáticas y modelar los procesos fisiológicos (Signorelli, Wang, y Khan, 2021).

Evidencia reciente de la fisiología del cerebro sugiere que la experiencia depende de los patrones de activación eléctrica de los módulos de neuronas en la región talamocortical. Parece que la activación está en función de una clasificación de la información entrante. Dado esto, se amplía el modelo de la integración de la información a la “Teoría de la información cerrada de la consciencia”. En esta se plantea que la consciencia es resultado de la integración de la información ambiental no trivial. Esto implica que de toda la información que entra en el sistema sólo la que tiene valor es la que pasa a la siguiente etapa de procesamiento (Chang, *et al.*, 2020). Esta teoría no explica cómo es que se discrimina la información entrante del sistema, lo cual se aborda por la teoría del área de trabajo global.

La “Teoría del Área de Trabajo Global” supone que la consciencia es resultado de un procesamiento global en el cerebro. Propone que hay redes neuronales inconscientes distribuidas por todo el cerebro, lo que define el área de trabajo. Estas redes actúan como módulos que compiten por alcanzar el área de procesamiento global. En este contexto se plantea que la consciencia es una característica emergente de las interacciones colectivas entre los diferentes procesadores modulares. La experiencia en primera persona se alcanza cuando la suma de estímulos en los procesadores supera un umbral (Baars, 1997; Mashour, *et al.*, 2020; Nani *et al.*, 2019; Reggia, 2013; Verschure, 2016). De la misma manera los pensamientos se generan a partir de la competencia de las redes inconscientes (Carruthers, 2018).

El modelo se sustenta en la intercomunicación cerebral globalmente distribuida que se origina en la corteza parietal y prefrontal. Cuando la información llega al área de trabajo global se transmite al resto del cerebro permitiendo que sea accesible para procesos como el acceso a la memoria, percepción, atención, movimiento, etcétera (Mashour *et al.*, 2020). Entonces la conectividad entre las diferentes regiones es el correlato de la conectividad fun-

cional. Cada NCC representa una configuración posible dentro de un sistema dinámico que depende del nivel de organización (Mashour y Hudetz, 2019).

La dinámica del área de trabajo global se coloca en las relaciones anatómicas de los procesadores. Se ha propuesto que existe un área de tres niveles de procesamiento que inicia en los bucles de retroalimentación de la corteza de los estímulos sensoriales, después una integración de la información en el tálamo y después una salida hacia la corteza. En este enfoque la consciencia es generada en el tálamo que funciona como el eje central de la integración multisensorial. Este modelo supone que para generar la experiencia es necesario que la información de la corteza sea integrada y regresada a ella por cada experiencia generada (Jerath *et al.*, 2015).

Una característica clave del área de trabajo global es que sólo considera una interpretación a la vez por cada conjunto de estímulos. Esto implica un sistema de competencia entre experiencias, lo que ocasiona que el resto de las posibilidades queden bloqueadas. Por lo tanto, se sugiere que este modelo logra explicar la diferencia de tiempo entre las interpretaciones que da cada conjunto de estímulos. Sin embargo, los críticos de la teoría argumentan que eso no explica la generación del *qualia* (Schurger y Graziano, 2022). Más bien este modelo genera una explicación del esquema de atención.

El área de trabajo global provee una manera de explicar cómo se da el esquema de atención. Al igual que la propuesta de explicación de la experiencia, se basa en un proceso competitivo de activación que funciona como un filtro de la información de interés; la cual se va aclimatando. Esta propuesta se sustenta con datos del comportamiento neuronal de distintas regiones cerebrales. Éstas muestran un esquema de recompensa para diferenciar entre lo que se considera ruido e información no trivial (Brody, 1999; Hocker, *et al.*, 2021). Con este esquema se sugiere que la consciencia requiere una experiencia de sí mismo y un modelo cognitivo del procesamiento que ocurre en el área de trabajo (Reggia, 2013; Steel, 2021). Para responder esto se ha intentado integrar las teorías mencionadas.

La teoría del área de trabajo global, al igual que la de integración de la información, se sustenta en que la consciencia es resultado de un conjunto de redes interconectadas y altamente complejas. Mientras que el modelo de la integración de la información se enfoca en

la arquitectura funcional y cantidad de integración de las redes, el modelo de área de trabajo global se enfoca más en los mecanismos de reclutamiento de las redes frontoparietales; y cómo estas generan la experiencia en primera persona. De manera interesante, al contrastar las dos hipótesis mediante el análisis funcional de la corteza somatosensorial y premotora ventral de humanos, se observó que la matemática del modelo de la integración no siempre coincide con las experiencias reportadas en primera persona, mientras que sí lo hace con los mecanismos de ignición y competencia del modelo de área de trabajo global (Noel *et al.*, 2019).

Un intento de integración de ambas teorías es “La teoría de la disponibilidad global”. Este modelo se expone a partir de la definición de la estructura conceptual máximamente irreductible. En esta teoría se plantean criterios y restricciones para ver si un estado neuronal tiene una representación consciente, lo que refiere como representación fenoménica. Cuando hay representación quiere decir que la integración o el procesamiento están causando una experiencia. En esta teoría se observa la integración de la información a través de procesadores cerebrales independientes que hacen operaciones en conglomerados, lo que supone el área de trabajo global (Wiese, 2018). En concreto es un modelo que supone la integración de las redes neuronales dentro de un área de trabajo global.

Los datos obtenidos en ambas teorías se pueden analizar con métodos geométricos para sistemas dinámicos. El análisis geométrico se sustenta en que el contenido de una experiencia tiene aspectos relacionales, lo que implica una manifestación particular de un dominio perceptivo o conceptual. Un ejemplo es el análisis geométrico de datos de activación neuronal con imagenología cerebral que permitió observar la participación del hipocampo en la generación de pensamientos abstractos (Nieh *et al.*, 2021). Dado lo anterior, supone que los espacios de trayectoria son isomorfos a los dominios de percepción, lo que sugiere una estructura formal de la experiencia (Fekete *et al.*, 2016).

El modelo del área de trabajo global proporciona un marco para una explicación científica y reduccionista de la experiencia, sin embargo, quedan preguntas por responder como: ¿Qué tan global debe ser el área de trabajo? ¿Los cerebros de diferentes tamaños dan una gradación de consciencia entre especies? ¿Sólo las

estructuras de los mamíferos o primates llegan a tener este tipo de mecanismo? (Carruthers, 2018; Rolls, 2020).

La “Teoría del Pensamiento de Alto Orden” complementa a la del área de trabajo global describiendo una posible vía del procesamiento de la información; respondiendo cómo se traduce la información (Rolls, 2020). En esta teoría se supone que un sistema es consciente con relación a la capacidad de pensarse a sí mismo. Los niveles de consciencia en esta teoría se suponen en la capacidad de pensar sobre los mismos pensamientos (Schurger y Graziano, 2022). Esto implica un grado de recursividad.

La teoría del pensamiento de alto orden es una teoría computacional de la consciencia. Esta teoría supone la existencia de los NCC y se enfoca en cómo es que se produce el cómputo para generar la experiencia. Propone un sistema computacional en el que se utilizan estados jerárquicos para realizar la asignación de pensamientos y experiencias. Esta asignación se realiza mediante la manipulación recursiva de símbolos sintácticos de la memoria, en las diferentes jerarquías para alcanzar un alto orden de pensamiento. Lo anterior, está reportado en la correlación con la función observada de la corteza prefrontal en humanos (Reggia, 2013; Rolls, 2020). Una crítica de esta teoría es que sólo contempla el pensamiento de los humanos basado en los NCC.

Los programas de investigación basados en los NCC son un intento de explicar la experiencia con base en la mecánica del cerebro (Schurger y Graziano, 2022). La gran mayoría se sustenta con evidencia de reportes de primera persona de humanos y se generaliza a las regiones anatómicas de éstos o de los modelos animales en mamíferos (Jerath *et al.*, 2015). Sin embargo, estos modelos no han resuelto el problema difícil de la consciencia, sino que han dado las descripciones mecanicistas de la experiencia.

EVOLUCIÓN, COMPLEJIDAD Y CONSCIENCIA

Con los hallazgos presentados en la sección anterior se cumple la primera parte del objetivo. En esta sección se cumple la segunda parte del objetivo por lo que se discuten las ventajas de un programa de investigación centrado en la consciencia definido por la biología evolutiva y las ciencias de la complejidad.

Una posible causa de la carencia de respuesta al problema difícil es la contradicción de estudiar con métodos reduccionistas algo que se ha definido como irreductible. Por lo cual, se propone que las ciencias de la complejidad son un esquema de análisis e interpretación adecuado para el estudio de la consciencia y marcan el camino para completar los modelos existentes (Feinberg y Mallatt, 2020; Polák y Marvan, 2019).

La definición de los sistemas complejos se realiza bajo los principios de emergencia, equifinalidad y autorregulación. El principio de emergencia implica que la interacción de los elementos del sistema origina características que no se pueden explicar por el análisis separado de cada uno. El de equifinalidad se refiere a que el estado final en sistemas cerrados sólo depende de las condiciones iniciales por lo que siempre es el mismo. En sistemas abiertos el estado final depende de las condiciones iniciales y del contexto, por lo que es posible obtener el mismo estado final con diferentes condiciones iniciales y distintos estados finales con las mismas condiciones iniciales. El principio de autorregulación significa que el sistema se estabiliza por sí mismo y que se dirige hacia estados de equilibrio (Hofkirchner y Schafrank, 2011; Mitchell, 1972; Ramirez, 1999).

Las ciencias de la complejidad pueden cerrar la brecha explicativa del problema difícil al proponer como juego de hipótesis que la consciencia surge de los cerebros, el cuerpo y el ambiente. En este enfoque se supone a la consciencia como una característica en construcción durante el desarrollo de los organismos. Los métodos de las ciencias de la complejidad son capaces de falsear ambas hipótesis, por lo tanto, pueden cerrar la brecha explicativa. Para lograrlo se requiere una explicación multifactorial que incluya la naturaleza individual que surge de la vida encarnada y las características neuronales (Feinberg y Mallatt, 2019).

En este sentido la construcción de la consciencia de un agente biológico no sólo es cuestión del funcionamiento del sistema nervioso. Además, se deben tomar en cuenta las siguientes dimensiones: ontológica, genética, fisiológica, adaptativa y conductual (Tosches y Laurent, 2019). Los individuos se consideran holobiontes, es decir que están compuestos por interacciones simbióticas (Boem, Ferretti, y Zipoli, 2021). En cuanto a la dimensión genética se involucra a la regulación fisiológica por medio del ambiente y su transducción en diferentes conductas

por mecanismos endócrinos (Grewal, Bornstein-Forst, Burnell, Glazer *et al.*, 2006; Palanza y Parmigiani, 2017). Este panorama abarca dimensiones biológicas que no se consideran por la visión neurocentrista dominante, sin embargo, son parte de la perspectiva encarnada de la consciencia. Con base en los principios de la complejidad y la representación de agente biológico queda dibujar un esquema para el estudio de la consciencia.

Se propone una organización jerárquica de dos niveles causales de la consciencia que incluye: las propiedades generales de los seres vivos y las neurobiológicas (Ellia y Chis-Ciure, 2022; Feinberg y Mallatt, 2020). Las propiedades generales de los seres vivos son: encarnación, autoorganización, teleonomía y adaptabilidad. Las características neurobiológicas son: alta conectividad de las redes de control, organización modular del centro de control, convergencia multisensorial, representación isomórfica de las redes neuronales con las experiencias, esquema de atención y acceso a la memoria. Al pensar estas características en función de los seres vivos se puede extender el estudio a diferentes niveles por medio de la biología evolutiva (Feinberg y Mallatt, 2016a). Además de la causalidad de la consciencia se necesita la definición de los dominios de la experiencia.

La experiencia se divide en tres dominios: el dominio del medio externo, el neuronal y el de la experiencia. Cada dominio presenta sus propios mecanismos físicos independientes de los otros y cuenta con sus respectivas interacciones de los elementos internos. Los tres dominios se pueden modelar en un espacio de estados con tres ejes. El dominio del medio externo se representa en el dominio neuronal y este, a su vez, se refleja en la experiencia. Las estructuras de cada dominio son conjuntos de relaciones definidas sobre un estímulo (Lyre, 2022). Además de identificar los sistemas biológicos, las propiedades causales y los dominios de la experiencia, es necesario dibujar una manera de acceso conceptual para el diseño de estudios.

Para aterrizar el estudio en términos de la complejidad se propone el reconocimiento de cuatro dimensiones epistemológicas de la experiencia subjetiva. Éstas son: fenomenológica, semántica, fisiológica y funcional. La fenomenológica se refiere a la existencia de la experiencia. La semántica se enfoca en el objeto de estudio, por ejemplo, la naturaleza de la consciencia, su funcionalidad, etcétera. La fisiológica se encarga de los meca-

nismos neuronales y fisiológicos que deben presentar los organismos. Finalmente, la funcional se refiere a la utilidad de la existencia de la consciencia (Jonkisz *et al.*, 2017). Se propone que cada nivel causal se define en estos términos en un esquema de la complejidad.

La interacción entre los niveles se comporta con causalidad recíproca y sus estados internos son recursivos. Este comportamiento es el núcleo del estudio de la consciencia desde el punto de vista de la complejidad y se propone para estudiar los fenómenos biológicos relacionados a ella (Ellia y Chis-Ciure, 2022; Feinberg y Mallatt, 2020). En este esquema los NCC se estudian desde las relaciones causales genéticas hacia la conectividad de las redes y la influencia de arriba-abajo y abajo-arriba.

Este es un acercamiento no reduccionista que se basa en la composición biológica de los sistemas en desarrollo y la causalidad recíproca. En este esquema se cambia la perspectiva de la creación de la consciencia de una ontología física a una ontología biológica. La emergencia de la consciencia es por medio de los procesos corporales *vividos* y *vivientes*. Esto plantea la construcción de la consciencia y pertenece a una reformulación radical de la encarnación de las experiencias (Signorelli y Meling, 2021).

La causalidad recíproca se encuentra en los procesos recursivos de las redes y la dependencia entre ellas. Esto se observa en la sucesión de lo vivido y lo viviente; lo cual no es reductible. Los elementos básicos de los seres vivos (*biobrane*) son multidimensionales, dinámicos y forman una unidad. El siguiente nivel lo conforman los sistemas (*autobrane*) y se componen de los elementos básicos en una manera recursiva y autoorganizada. Con este esquema se propone que las interacciones recíprocas entre los elementos y los niveles de organización generan un sistema global operacionalmente cerrado y autorregulado. Estas interacciones son necesarias en todos los niveles para generar la experiencia. El grado en el que se generan las interacciones es lo que define el contenido de la experiencia sensorial (Signorelli y Meling, 2021).

Este tipo de argumentos supone que todos los sistemas pueden ser conscientes si alcanzan ese nivel de interacciones y conexiones. Un punto a consideración es el hecho de que el funcionamiento fisiológico parece comportarse como una máquina de estados finitos y no como una computadora (Moscoso del Prado, 2009). Por tal motivo, se plantea que los isomorfismos de la consciencia

no sólo se deben estudiar a un nivel de las interacciones anatómicas de mamíferos, sino que se deben incluir los niveles de organización inferiores, los superiores y otras organizaciones estructurales representadas por otros grupos taxonómicos (Guevara *et al.*, 2020). Esto genera un camino de entrada a un marco evolutivo de la ontología de la consciencia.

Una perspectiva funcionalista y evolutiva es capaz de eliminar el sesgo que presupone una organización igual a la de los humanos. Se propone que las características básicas de los seres vivos y las neurológicas dan un abanico de tipos de consciencia. Se han observado características fenomenológicas en organismos con organizaciones del sistema nervioso distintas a la de los primates, como en aves, artrópodos y moluscos (Boly, Massimini, Tsuchiya, Postle *et al.*, 2017; Feinberg y Mallatt, 2019; Grossberg, 2017; Tosches y Laurent, 2019).

Se supone que los estados neuronales tienen una función adaptativa y que la manera en que realizan el cómputo es con relación a la adecuación del sistema. Entonces la retroalimentación entre los NCC de los módulos cerebrales se vuelve consciente cuando tiene un efecto adaptativo (van Hateren, 2019). Para explicar la funcionalidad de la consciencia se plantea que es parte del mecanismo de aclimatación del cuerpo. Se propone que funciona como un amortiguador conductual para las perturbaciones ambientales. Entonces la imagen sensorial se transforma en un problema planteado. Este marco adaptativo sugiere que todas las imágenes sensoriales son conscientes ya que son la forma en que los organismos experimentan la información ambiental (Peper, 2020). Este pensamiento genera un camino para una interpretación evolutiva de la consciencia desde los datos fisiológicos. Sin embargo, se genera una dificultad de integración de los datos de las diferentes dimensiones.

Las herramientas matemáticas permiten la integración de datos de las diferentes dimensiones. La teoría de redes y de grafos generan un esquema de análisis inter- e intradimensional que puede usarse con datos empíricos. Por otra parte, se sugiere utilizar análisis no determinístico de sistemas dinámicos cuando un método analítico no es posible. Por ejemplo, se ha observado que el comportamiento eléctrico de los NCC analizados durante la experiencia en primera persona presentan un comportamiento histerético (Kim, Moon, Mashour y Lee, 2018). Además, se ha observado una diferencia en

la dimensión fractal de la conectividad de las redes bajo distintas condiciones de sensorialidad (Varley, Craig, Adapa, Finoia *et al.*, 2020). Este análisis puede integrarse con un esquema de la teoría de redes, por lo cual, el análisis geométrico de sistemas dinámicos no deterministas funge como una herramienta metodológica para acceder a una interpretación de la biología evolutiva de los procesos físicos que causan la consciencia.

La dimensión física no se puede excluir de la complejidad ni de la generación de la consciencia. Un sistema vivo se puede definir como un estado estacionario sin equilibrio desde un punto de vista físico-matemático (Rorot, 2021). En este sentido la inclusión del principio de energía libre genera un esquema conceptual de análisis que se puede incluir con una perspectiva de la complejidad (Kiverstein y Sims, 2021) y ser interpretada desde una visión evolutiva.

El concepto de energía libre se puede entender como la diferencia de la complejidad de estados posibles de un sistema menos la precisión de la respuesta obtenida. Se propone que hay un proceso de inferencia que realiza un muestreo de la complejidad en términos de las redundancias para generar una experiencia más precisa. De esta forma cada *qualia* se puede entender como un proceso físico (Rorot, 2021). Desde este punto de vista el *qualia* es una estructura autoorganizada construida por exportar entropía. Esto es subjetivo porque la disminución de entropía no puede ser observada físicamente (Beshkar, 2018).

El principio de energía libre propone que los sistemas deben regular los cambios ambientales y prevenir la acumulación de entropía. Este principio supone que el cerebro es un controlador predictivo que se puede modelar mediante inferencia probabilística (Friston, 2010; Safron, 2020). Este modelo explica por qué no todos los sistemas irreductibles son capaces de generar consciencia inspirado en el modelo de área de trabajo global. Supone que debe haber un marco de referencia capaz de generar coherencia causal espacial y temporal de lo propio y el mundo. De esta manera la evolución del sistema nervioso se propone como la evolución de los flujos de consciencia que emergen a través de la capacidad predictiva sensorial motora (Safron, 2020). Uno de los retos en este nivel es la integración de los datos de diferentes dimensiones.

Dado lo anterior, se propone que la biología evolutiva

propone un panorama de estudio adecuado para la investigación de la consciencia. Se plantea que los sistemas complejos generan un esquema de acceso metodológico y conceptual para la interpretación de los datos empíricos, donde los puntos que dirigen este enfoque son: 1) El análisis funcional adaptativo de la consciencia. 2) La emergencia de las estructuras modulares que permiten la integración de la información. 3) Las novedades evolutivas de las capacidades sensoriales y su correlación con el apareamiento de conductas y *qualia*. 4) La correspondencia genética de las capacidades cognitivas. 5) El efecto del medio sobre el desarrollo de la consciencia. 6) La causalidad recíproca desde el nivel genético hasta el ambiental.

CONCLUSIONES

Las distintas connotaciones que están construyendo el concepto de consciencia plantean un fenómeno de múltiples dimensiones. Gran parte de éstas corresponden a un dominio biológico, sin embargo, no se acostumbra a dar este enfoque, más bien se generaliza con base en los procesos físicos con un antropocentrismo evidente. El estudio por separado de estas dimensiones ha fallado en proponer una explicación causal que contemple los aspectos fenoménicos. En este sentido, la interpretación de los datos empíricos desde los sistemas complejos genera un panorama para evadir las limitantes analíticas de la reducción en partes de la consciencia. Dado lo anterior, se propone un esquema de análisis de las ciencias de la complejidad que contemple el dominio fenomenológico, biológico y físico con sus respectivas dimensiones.

Dado lo anterior se propone que la complejidad y la biología evolutiva generan un marco adecuado al estudio de la consciencia considerando los siguientes puntos: 1) El análisis funcional adaptativo de la consciencia. 2) La emergencia de las estructuras modulares que permiten la integración de la información. 3) Las novedades evolutivas de las capacidades sensoriales y su correlación con el apareamiento de conductas y *qualia*. 4) La correspondencia genética de las capacidades cognitivas. 5) El efecto del medio sobre el desarrollo de la consciencia. 6) La causalidad recíproca desde el nivel genético hasta el ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo forma parte de los requisitos necesarios para la obtención de grado de Doctor en Ciencias en el Posgrado en Ciencias Biológicas, de la UNAM. Agradezco al CONAHCYT por la beca otorgada. Agradezco al Dr. Pablo Padilla, al Dr. Mark Olson y al Dr. Juan José Morrone por sus comentarios.

REFERENCIAS

- Baars, B. J. (1997). *In the theater of consciousness: The workspace of the mind*. New York: Oxford University. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195102659.001.1
- Barnden, J. A. (2020). The meta-dynamic nature of consciousness. *Entropy*, 22(12), 1433. DOI: 10.3390/e22121433
- Bayne, T. (2018). On the axiomatic foundations of the integrated information theory of consciousness. *Neuroscience of Consciousness*, 2018(1), niy007. DOI: 10.1093/nc/niy007
- Beshkar, M. (2018). A thermodynamic approach to the problem of consciousness. *Medical Hypotheses*, 113(april 2018), pp. 15–16. DOI: 10.1016/j.mehy.2018.02.003
- Boem, F., Ferretti, G., & Zipoli Caiani, S. (2021). Out of our skull, in our skin: the Microbiota-Gut-Brain axis and the Extended Cognition Thesis. *Biology and Philosophy* (Vol. 36) art. 14. DOI: 10.1007/s10539-021-09790-6
- Boly, M., Massimini, M., Tsuchiya, N., Postle, B. R., et al. (2017). Are the neural correlates of consciousness in the front or in the back of the cerebral cortex? Clinical and neuroimaging evidence. *Journal of Neuroscience*, 37(40), pp. 9603–9613. DOI: 10.1523/jneurosci.3218-16.2017
- Bridewell, W., & Isaac, A. M. C. (2021). Apophatic science: How computational modeling can explain consciousness. *Neuroscience of Consciousness*, 2021(1), niab010. DOI: 10.1093/nc/niab010
- Brody, C. D. (1999). Correlations without synchrony. *Neural Computation*, 11(7), pp. 1537–1551. DOI: 10.1162/089976699300016133
- Carruthers, P. (2018). Comparative psychology without consciousness. *Consciousness and Cognition*, 63(May), pp. 47-60. DOI: 10.1016/j.concog.2018.06.012
- Chalmers, D. (2007). The hard problem of consciousness. In S. Schneider, M. Velmans (eds.). *The Blackwell companion to consciousness* (pp. 32-42). New York: Wiley. DOI: 10.1002/9781119132363
- Chang, A. Y. C., Biehl, M., Yu, Y., & Kanai, R. (2020). Information closure theory of consciousness. *Frontiers in Psychology*, 11, 1504. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.01504
- Cohen, M. A., & Dennett, D. C. (2011). Consciousness cannot be separated from function. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(8), pp. 358-364. DOI: 10.1016/j.tics.2011.06.008
- Crick, F., & Koch, C. (2003). A framework for consciousness. *Nature Neuroscience*, 6(2), pp. 119-126. DOI: 10.1038/nn0203-119
- Dennett, D. C. (2018). Facing up to the hard question of consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1755), 20170342. Recuperado de <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2017.0342> o DOI: 10.1098/rstb.2017.0342
- Earl, B. (2014). The biological function of consciousness. *Frontiers in Psychology*, 5, 0697. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00697
- Ellia, F., & Chis-Ciure, R. (2022). Consciousness and complexity: Neurobiological naturalism and integrated information theory. *Consciousness and Cognition*, 100, 103281. DOI: 10.1016/j.concog.2022.103281
- Facco, E., Lucangeli, D., & Tressoldi, P. (2017). On the science of consciousness: Epistemological reflections and clinical implications. *Explore*, 13(3), 163-180. DOI: 10.1016/j.explore.2017.02.007
- Feinberg, T. E., & Mallatt, J. (2016a). The nature of primary consciousness. A new synthesis. *Consciousness and Cognition*, 43, 113-127. DOI: 10.1016/j.concog.2016.05.009
- Feinberg, T. E., & Mallatt, J. M. (2016b). *The ancient origins of consciousness. How the brain created experience*. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology. DOI: 10.7551/mitpress/10714.001.0001

- Feinberg, T. E., & Mallatt, J. M. (2019). Subjectivity “demystified”: Neurobiology, evolution, and the explanatory gap. *Frontiers in Psychology, 10*, 01686. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01686
- Feinberg, T. E., & Mallatt, J. (2020). Phenomenal consciousness and emergence: Eliminating the explanatory gap. *Frontiers in Psychology, 11*, 01041. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.01041
- Fekete, T., van Leeuwen, C., & Edelman, S. (2016). System, subsystem, hive: Boundary problems in computational theories of consciousness. *Frontiers in Psychology, 7*, 01041. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.01041
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience, 11*, pp. 127-138. DOI: 10.1038/nrn2787
- Frith, C., & Rees, G. (2007). A brief history of the scientific approach to the study of consciousness. In *The Blackwell companion to consciousness* (pp. 1-16). Recuperado de DOI: 10.1002/9781119132363
- Gamez, D. (2014). The measurement of consciousness: A framework for the scientific study of consciousness. *Frontiers in Psychology, 5*, 0714. Recuperado de DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00714
- Grewal, P. S., Bornstein-Forst, S., Burnell, A. M., Glazer, I., et al. (2006). Physiological, genetic, and molecular mechanisms of chemoreception, thermobiosis, and anhydrobiosis in entomopathogenic nematodes. *Biological Control, 38*(1), pp. 54-65. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2005.09.004
- Grossberg, S. (2017). Towards solving the hard problem of consciousness: The varieties of brain resonances and the conscious experiences that they support. *Neural Networks, 87*, pp. 38-95. DOI: 10.1016/j.neunet.2016.11.003
- Guevara, R., Mateos, D. M., & Pérez Velázquez, J. L. (2020). Consciousness as an emergent phenomenon: A tale of different levels of description. *Entropy, 22*(9), 921. DOI: 10.3390/e22090921
- Gutfreund, Y. (2018). The mind-evolution problem: The difficulty of fitting consciousness in an evolutionary framework. *Frontiers in Psychology, 9*, 1537. Recuperado de DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01537
- Hocker, D., Brody, C. D., Savin, C., & Constantinople, C. M. (2021). Subpopulations of neurons in IOfC encode previous and current rewards at time of choice. *ELife, 10*, e70129. DOI: 10.7554/eLife.70129
- Hoffman, D. (2018). *The case against reality: Why evolution hid the truth from our eyes*. New York: W. W. Norton.
- Hofkirchner, W., & Schafranek, M. (2011). General System Theory. En C. Hooker, (ed.) *Handbook of the philosophy of science, v.10. Philosophy of Complex Systems* (pp. 177-194). Amsterdam: North Holland. DOI: 10.1016/B978-0-444-52076-0.50006-7
- Hunt, T., & Schooler, J. W. (2019). The easy part of the hard problem: A resonance theory of consciousness. *Frontiers in Human Neuroscience, 13*, 0378. Recuperado de DOI: 10.3389/fnhum.2019.00378
- Jerath, R., Crawford, M. W., & Barnes, V. A. (2015). A unified 3D default space consciousness model combining neurological and physiological processes that underlie conscious experience. *Frontiers in Psychology, 6*, 1204. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01204
- Ji, Sungchul. (2017). *The cell language theory: Connecting mind and matter*. New Jersey: World Scientific.
- Jonkisz, J., Wierzchoń, M., & Binder, M. (2017). Four-dimensional graded consciousness. *Frontiers in Psychology, 8*, 0420. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00420
- Jylkkä, J., & Railo, H. (2019). Consciousness as a concrete physical phenomenon. *Consciousness and Cognition, 74*, 102779. DOI: 10.1016/j.concog.2019.102779
- Kandel, E. R. (2021). *La nueva biología de la mente*. Mexico: Paidós.
- Kent, L., & Wittmann, M. (2021). Time consciousness: The missing link in theories of consciousness. *Neuroscience of Consciousness, 2021*(2), niab011. DOI: 10.1093/nc/niab011
- Kim, H., Moon, J. Y., Mashour, G. A., & Lee, U. C. (2018). Mechanisms of hysteresis in human brain networks during transitions of consciousness and unconsciousness: Theoretical principles and empirical evidence. *PLoS Computational Biology, 14*(8), e1006424. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1006424
- Kitchener, P. D., & Hales, C. G. (2022). What neuroscientists think, and don't think, about consciousness. *Frontiers in Human Neuroscience, 16*, 767612. DOI: 10.3389/fnhum.2022.767612

- Kiverstein, J., & Sims, M. (2021). Is free-energy minimisation the mark of the cognitive? *Biology and Philosophy*, 36, art. 25. DOI: 10.1007/s10539-021-09788-0
- Klein, C., & Barron, A. B. (2020). How experimental neuroscientists can fix the hard problem of consciousness. *Neuroscience of Consciousness*, 2020, niaa009. DOI: 10.1093/nc/niaa009
- Laszlo, E. (1997). *El cosmos creativo: hacia una ciencia unificada de la materia, la vida y la mente*. Barcelona: Kairós.
- Lloyd, P. B. (2020). Modelling consciousness within mental monism: An automata-theoretic approach. *Entropy*, 22(6), 698. DOI: 10.3390/e22060698
- Loorits, K. (2014). Structural qualia: A solution to the hard problem of consciousness. *Frontiers in Psychology*, 5, 0237. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00237
- Lyre, H. (2022). Neurophenomenal structuralism. A philosophical agenda for a structuralist neuroscience of consciousness. *Neuroscience of Consciousness*, 2022(1), niac012. DOI: 10.1093/nc/niac012
- Maier, A., & Tsuchiya, N. (2021). Growing evidence for separate neural mechanisms for attention and consciousness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83, pp. 558-576. DOI: 10.3758/s13414-020-02146-4
- Mallatt, J., Blatt, M. R., Draguhn, A., Robinson, D. G., et al. (2021). Debunking a myth: plant consciousness. *Protoplasma*, 258, pp. 459-476. DOI: 10.1007/s00709-020-01579-w
- Manzotti, R., & Jeschke, S. (2016). A causal foundation for consciousness in biological and artificial agents. *Cognitive Systems Research*, 40, pp. 172-185. DOI: 10.1016/j.cogsys.2015.11.001
- Mashour, G. A., & Hudetz, A. G. (2019). Neural Correlates of Unconsciousness in Large-Scale Brain Networks Defining and Contextualizing the Neural Correlates of Unconsciousness, 41(3), 150-160. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5835202/pdf/nihms935023.pdf> o DOI: 10.1016/j.tins.2018.01.003.
- Mashour, G. A., Roelfsema, P., Changeux, J. P., & Dehaene, S. (2020). Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis. *Neuron*, 105(5), pp. 776-798. DOI: 10.1016/j.neuron.2020.01.026
- Minot, C. S. (1902). The problem of consciousness in its biological aspects. *Science*, new series, 16(392), 1-12. Recuperado de <http://www.jstor.com/stable/1628678>
- Mitchell, G. (1972). Bertalanffy's general systems theory: the topology of mind development. En *Mind Development Home Page*. Recuperado de <https://trans4mind.com/mind-development/systems.html>
- Modolo, J., Hassan, M., Wendling, F., & Benquet, P. (2020). Decoding the circuitry of consciousness: From local microcircuits to brain-scale networks. *Network Neuroscience*, 4(2), pp. 315-337. DOI: 10.1162/netn_a_00119
- Moscoso del Prado M., F. (2009). The thermodynamics of human reaction times. *arXiv*, 0908.3170v1. DOI: 10.48550/arXiv.0908.3170
- Nani, A., Manuella, J., Mancuso, L., Liloia, D., et al. (2019). The neural correlates of consciousness and attention: Two sister processes of the brain. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1169. DOI: 10.3389/fnins.2019.01169
- Nieh, E. H., Schottdorf, M., Freeman, N. W., Low, R. J., et al. (2021). Geometry of abstract learned knowledge in the hippocampus. *Nature*, 595, pp. 80-84. DOI: 10.1038/S41586-021-03652-7
- Niikawa, T., Miyahara, K., Hamada, H. T., & Nishida, S. (2022). Functions of consciousness: Conceptual clarification. *Neuroscience of Consciousness*, 2022(1), niac006. DOI: 10.1093/nc/niac006
- Noel, J. P., Ishizawa, Y., Patel, S. R., Eskandar, E. N., et al. (2019). Leveraging nonhuman primate multisensory neurons and circuits in assessing consciousness theory. *Journal of Neuroscience*, 39(38), pp. 7485-7500. DOI: 10.1523/jneurosci.0934-19.2019
- Owen, M. (2020). The causal efficacy of consciousness. *Entropy*, 22(8), 823. DOI: 10.3390/e22080823
- Palanza, P., & Parmigiani, S. (2017). How does sex matter? Behavior, stress and animal models of neurobehavioral disorders. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 76 part A, pp. 134-143. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2017.01.037
- Pennartz, C. M. A. (2022). What is neurorepresentationalism? From neural activity and predictive processing to multi-level representations and consciousness. *Behavioural Brain Research*, 432, 113969. DOI: 10.1016/j.bbr.2022.113969
- Pennartz, C. M. A., Farisco, M., & Evers, K. (2019). Indicators and criteria of consciousness in animals and

- intelligent machines: An inside-out approach. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *13*, 0026. DOI: 10.3389/fnsys.2019.00025
- Penrose, R. (2012). *Las Sombras de la mente*. Barcelona: Crítica.
- Peper, A. (2020). A general theory of consciousness I: Consciousness and adaptation. *Communicative and Integrative Biology*, *13*(1), pp. 6–21. Recuperado de DOI: 10.1080/19420889.2020.1713967
- Polák, M., & Marvan, T. (2018). Neural correlates of consciousness meet the theory of identity. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1269. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01269
- Polák, M., & Marvan, T. (2019). How to mitigate the hard problem by adopting the dual theory of phenomenal consciousness. *Frontiers in Psychology*, *10*, 2837. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02837
- Ponte, G., Chiandetti, C., Edelman, D. B., Imperadore, P., et al. (2022). Cephalopod behavior: From neural plasticity to consciousness. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *15*, 787. DOI: 10.3389/fnsys.2021.787139
- Ramírez, S. (1999). *Teoría General de Sistemas de Ludwig von Bertalanffy*. México: UNAM. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades.
- Reggia, J. A. (2013). The rise of machine consciousness: Studying consciousness with computational models. *Neural Networks*, *44*, pp. 112-131. DOI: 10.1016/j.neunet.2013.03.011
- Rolls, E. T. (2020). Neural computations underlying phenomenal consciousness: A higher order syntactic thought theory. *Frontiers in Psychology*, *11*, 0655. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.00655
- Rorot, W. (2021). Bayesian theories of consciousness: A review in search for a minimal unifying model. *Neuroscience of consciousness*, *7*(2), pp. 1-14. DOI: 10.1093/nc/niab038
- Ruiz de Miras, J., Soler, F., Iglesias-Parro, S., Ibáñez-Molina, et al. (2019). Fractal dimension analysis of states of consciousness and unconsciousness using transcranial magnetic stimulation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *175*, pp. 129-137. DOI: 10.1016/j.cmpb.2019.04.017
- Safron, A. (2020). An integrated world modeling theory (IWMT) of consciousness: Combining integrated information and global neuronal workspace theories with the free energy principle and active inference framework; Toward solving the hard problem and characterizing agentic causation. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *3*, 0030. DOI: 10.3389/frai.2020.00030
- Schlicht, T. (2018). A methodological dilemma for investigating consciousness empirically. *Consciousness and Cognition*, *66*, pp. 91–100. DOI: 10.1016/j.concog.2018.11.002
- Schurger, A., & Graziano, M. (2022). Consciousness explained or described? *Neuroscience of consciousness*, *2022*(1), niac001. DOI: 10.1093/nc/niac001
- Sergent, C., & Dehaene, S. (2004). Neural processes underlying conscious perception: Experimental findings and a global neuronal workspace framework. *Journal of Physiology, Paris*, *98*(4-6), pp. 374-384. DOI: 10.1016/j.jphysparis.2005.09.006
- Seth, A. K. (2018). Consciousness: The last 50 years (and the next). *Brain and Neuroscience Advances*, *2*. DOI: 10.1177/2398212818816019
- Signorelli, C. M., & Meling, D. (2021). Towards new concepts for a biological neuroscience of consciousness. *Cognitive Neurodynamics*, *15*, pp. 783–804. DOI: 10.1007/s11571-020-09658-7
- Signorelli, C. M., Wang, Q., & Khan, I. (2021). A compositional model of consciousness based on consciousness-only. *Entropy*, *23*(3), 308. DOI: 10.3390/e23030308
- Singer, W. (2019). A naturalistic approach to the hard problem of consciousness. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *13*, 0058. DOI: 10.3389/fnsys.2019.00058
- Solms, M. (2018). The hard problem of consciousness and the free energy principle. *Frontiers in Psychology*, *9*, 2714. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.02714
- Steel, M. (2021). Modelling aspects of consciousness: A topological perspective. *Journal of Theoretical Biology*, *523*, 110713. DOI: 10.1016/j.jtbi.2021.110713
- Sturm, T. (2012). Consciousness regained? Philosophical arguments for and against reductive physicalism. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, *14*(1), pp. 55–63. DOI: 10.31887/DCNS.2012.14.1/tsturm
- Taylor, J. G. (1997). Neural networks for consciousness. *Neural Networks*, *10*(7), pp. 1207-1225. DOI: 10.1016/S0893-6080(97)00064-6

- Tononi, G. (2004). An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience*, 5, 42. DOI: 10.1186/1471-2202-5-42
- Tononi, G., & Koch, C. (2015). Consciousness: Here, there and everywhere? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1668), 0167. DOI: 10.1098/rstb.2014.0167
- Torday, J. S. (2018). From cholesterol to consciousness. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 132, pp. 52-56. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2017.08.009
- Tosches, M. A., & Laurent, G. (2019). Evolution of neuronal identity in the cerebral cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 56, pp. 199-208. DOI: 10.1016/j.conb.2019.04.009
- Tsuchiya, N., Taguchi, S., & Saigo, H. (2016). Using category theory to assess the relationship between consciousness and integrated information theory. *Neuroscience Research*, 107, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.neures.2015.12.007
- Tyler, C. W. (2020). Ten testable properties of consciousness. *Frontiers in Psychology*, 11, 1144. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.01144
- Usher, M. (2021). Refuting the unfolding-argument on the irrelevance of causal structure to consciousness. *Consciousness and Cognition*, 95, 103212. DOI: 10.1016/j.concog.2021.103212
- van Hateren, J. H. (2019). A theory of consciousness: computation, algorithm, and neurobiological realization. *Biological Cybernetics*, 113, pp. 357-372. DOI: 10.1007/s00422-019-00803-y
- Varley, T. F., Craig, M., Adapa, R., Finoia, P., et al. (2020). Fractal dimension of cortical functional connectivity networks & severity of disorders of consciousness. *PLoS ONE*, 15(2), e0223812. DOI: 10.1371/journal.pone.0223812
- Verschure, P. F. M. J. (2016). Synthetic consciousness: The distributed adaptive control perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1701), 0448. DOI: 10.1098/rstb.2015.0448
- Virmani, M., & Nagaraj, N. (2019). A novel perturbation based compression complexity measure for networks. *Heliyon*, 5(2), e01181. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01181
- Wallace, R. (2021). Embodied cognition and its pathologies: The dynamics of institutional failure on wickedly hard problems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 95, 105616. DOI: 10.1016/j.cnsns.2020.105616
- Wiese, W. (2018). Toward a mature science of consciousness. *Frontiers in Psychology*, 9, 0693. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00693
- Zhao, T., Zhu, Y., Tang, H., Xie, R., et al. (2019). Consciousness: New concepts and neural networks. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 13, 0302. DOI: 10.3389/fncel.2019.00302

NOTAS DE AUTOR

^aMaestro en Ciencias Biológicas por el Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM. Estudiante de doctorado del Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM en la Facultad de Ciencias. Sus principales líneas de investigación son biología evolutiva, vida artificial y biología del cáncer. Correo electrónico: sjmagg@comunidad.unam.mx. Autor de correspondencia.
ORCID:0009-0005-0126-1514