

Investigaciones en complejidad y salud

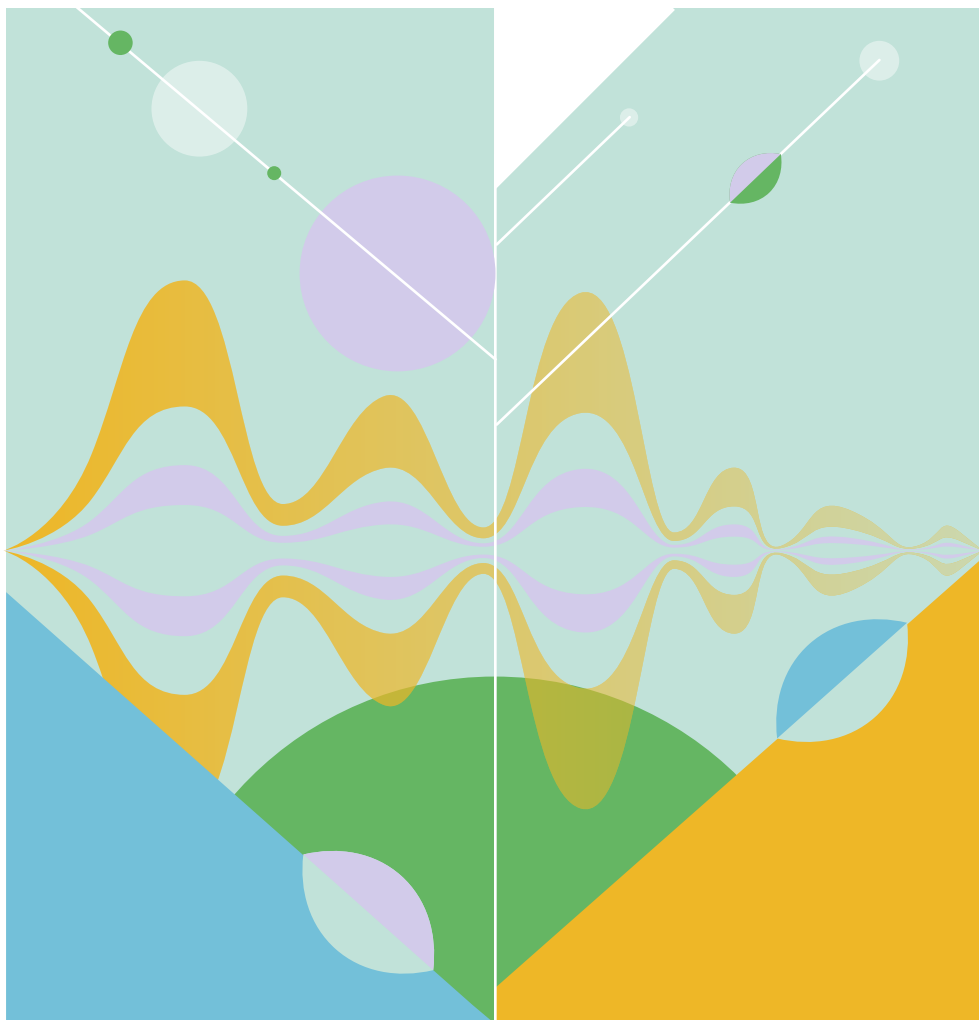
Facultad de Medicina

Grupo de Investigación Complejidad y Salud Pública

n.º 9

Año 3
Enero-febrero 2021
ISSN: 2665-1564

La extraña naturaleza
de la vida.
Biología cuántica,
complejidad, vida, salud



Autor y editor académico

Carlos Eduardo Maldonado ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9262-8879>

Año 3, n.º 9, enero-febrero 2021 | ISSN: 2665-1564

Investigaciones en complejidad y salud

Facultad de Medicina

Grupo de Investigación en Complejidad y Salud Pública

n.º 9

La extraña naturaleza de la vida Biología cuántica, complejidad, vida, salud

Carlos Eduardo Maldonado

INVESTIGACIONES EN COMPLEJIDAD Y SALUD

n.º 9 La extraña naturaleza de la vida

Biología cuántica, complejidad, vida, salud

Año 3, n.º 9, enero-febrero 2021 | ISSN: 2665-1564

<https://doi.org/10.18270/wp.n3.9>

© Universidad El Bosque

© Editorial Universidad El Bosque

© Carlos Eduardo Maldonado

Editor académico

Rectora: María Clara Rangel Galvis

Hecho en Bogotá D. C., Colombia

Vicerrectoría de Investigaciones

Editorial Universidad El Bosque

Av. Cra 9 n.º 131A-02, Bloque A, 6.º piso

+57 (1) 648 9000, ext. 1395

editorial@unbosque.edu.co

www.unbosque.edu.co/investigaciones/editorial

Editor: Miller Alejandro Gallego C.

Dirección gráfica y diseño: María Camila Prieto A.

Corrección de estilo: Ana María Orjuela-Acosta

Marzo de 2021

Bogotá, Colombia



Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la Editorial Universidad El Bosque.

Universidad El Bosque | Vigilada Mineducación. Reconocimiento como universidad: Resolución n.º 327 del 5 de febrero de 1997, MEN. Reconocimiento de personería jurídica: Resolución 11153 del 4 de agosto de 1978, MEN. Reacreditación institucional de alta calidad: Resolución n.º 013172 del 17 de julio 2020, MEN.

570.1 M15e

Maldonado, Carlos Eduardo

La extraña naturaleza de la vida Biología cuántica, complejidad, vida, salud / Carlos Eduardo Maldonado -- Bogotá: Universidad El Bosque, 2021

65 p.; 14,5 x 21,5 cm -- (Colección Complejidad y Salud; Vol. 9)

Incluye tabla de contenido y referencias bibliográficas

ISSN: 2665-1564

DOI: <https://doi.org/10.18270/wp.n3.9>

1. Complejidad (Filosofía) 2. Biología evolutiva 3. Epigenómica -- Ética 4. Vida -- Teorías 5. Evolución 6. Caos cuántico 7. Biología -- Investigaciones I Universidad El Bosque. Vicerrectoría de Investigaciones.

Fuente. SCDD 23ª ed. – Universidad El Bosque. Biblioteca Juan Roa Vásquez (Abril de 2021) - RR

Contenido

Introducción Pág. 6

1 Dos problemas complejos Pág. 12

2 La vida: un fenómeno alejado del equilibrio o en el filo (¿del caos?) Pág. 21

2.1. Biología cuántica: una transformación de la Física Pág. 25

2.2. La vida es un fenómeno Pág. 27

3 La mecánica cuántica, reconsiderada

3.1. La complejidad de la biología cuántica Pág. 30

4 Tres niveles de un mismo problema: complejizar el estudio de la vida Pág. 42

Bibliografía Pág. 50

Introducción

Sin la menor duda, uno de los descubrimientos más fantásticos en la historia de la humanidad lo lleva a cabo E. Schrödinger en 1944, con la formulación de un programa de investigación como jamás había sucedido. *¿Qué es la vida?*, produce una inflexión maravillosa en toda la historia de la civilización occidental, y desplaza el foco de la tradicional preocupación acerca del ser humano –una visión distintivamente antropológica, antropomórfica y antropocéntrica del mundo y el universo– hacia una comprensión centrada en un nuevo problema: la vida y los sistemas vivos. El concepto de naturaleza se amplía y se profundiza, relativamente a la tradición.

Varios hechos puntuales merecen ser destacados, en consecuencia:

- Primero, la Física descubre la vida como un programa de investigación –una expresión fuerte que merece ser subrayada constantemente–, no contra lo que, acaso, cabría esperar: la Biología, la Teología o la Religión, la Filosofía o las Ciencias sociales y humanas. Más específicamente, la que formula un programa de investigación antes inexistente es la física cuántica, que muy poco o nada tiene que ver con la historia tradicional de la Física.
- Segundo, precisamente, la física cuántica –cuya primera etapa abarca los años 1900 a 1935; habrá una segunda revolución cuántica que tiene lugar entre 1951 y nuestros días–, representa la más fuerte inflexión en la historia de Occidente, desde la antigüedad griega, acerca de la explicación del universo, la realidad, el mundo, la naturaleza, la vida. Notablemente,

- a título introductorio, se trata del reconocimiento explícito de que es posible quebrar el mecanicismo, el dualismo, el reduccionismo y el determinismo, que siempre constituyeron los rasgos específicos de racionalidad en Occidente. Y esta revolución la lleva a cabo la teoría más verificada, testeada, confirmada, falseada en toda la historia de la humanidad; ninguna otra teoría ha tenido este fenómeno tan ampliamente. La conclusión parcial que cabe extraer es que es, entonces, imposible adentrarse en la ecología del conocimiento sin un conocimiento, por lo menos, básico, pero sólido, acerca de lo que es la cuántica.
- Tercero, la formulación de la importancia y la necesidad de esclarecer abiertamente lo que sea la vida se lleva a cabo en medio de una de las peores circunstancias históricas de la humanidad: la Segunda Guerra Mundial, con todas sus consecuencias, precuelas y secuelas. La vida es descubierta en uno de los capítulos más negros de historia.
 - Finalmente, toda la historia que sigue a Schrödinger, así sea por caminos directos o indirectos, no admite dilaciones: en 1953 nace el código de la vida con Watson y Crick, el ADN; en el año 1977 se hace el descubrimiento de los límites de sostenibilidad planetaria –cfr. “la bomba demográfica”, “la explosión demográfica”, “el factor cuatro”, y otros– con los primeros informes al Club de Roma; en los años 2000 se consolida el tema, agónico, de los límites planetarios alrededor del Instituto Stockholm. En los años 70 también nace primero la hipótesis de Gaia, luego, la ciencia de

Gaia y con ello, la comprensión organicista del planeta, lo que fortalece una tendencia reciente que encuentra uno de sus pilares en la obra de V. Vernadsky en torno a la biosfera. Así, la Tierra deja de ser un fenómeno físico en el que hay -a la manera de contenedor y contenido- vida. La tierra misma está viva, y entonces deja de llamarse de forma física o fisicalista, Tierra o planeta. Adicionalmente, en los años 90, L. Margulis propone una novedosa teoría que explica, al mismo tiempo, el origen de la vida y la naturaleza de la misma: la simbiogénesis o endosimbiosis.

En el curso de los años, diferentes propuestas vienen a complementar la idea de Darwin que quiere explicar la teoría de la evolución; entre otras, la autoorganización, la emergencia. En los años 70 también se consolidan las ciencias de la tierra gracias a la verificación definitiva de la tectónica de placas y la deriva continental formulados unos lustros antes por Wegener. Por otra parte, gradualmente nace la cosmología científica y se va ampliando y fortaleciendo hasta la fecha poniendo de manifiesto que lo que acontece en el planeta no es, en absoluto inseparable ni distinto a lo que acontece, al cabo, en el universo. En otro plano, el desarrollo de la computación arroja nuevas técnicas y también nuevos conceptos en la comprensión y explicación de los sistemas vivos, con fantásticas consecuencias de orden epistemológico permitiendo el nacimiento, por ejemplo, de la biología sintética. Alrededor del giro del siglo XX hacia el siglo XXI se consolida el naci-

miento de la epigenética, la cual tiene el mérito, por primera vez, de poner de manifiesto que no existen dos cosas: la cultura y la naturaleza, sino una sola. No en última instancia, termina de nacer la biología cuántica.

Como quiera que sea, asistimos a una magnífica vitalidad en la investigación que ha arrojado nuevas y refrescantes luces sobre el más maravilloso y, desde cualquier punto de vista, el más complejo de todos los fenómenos en el universo: el estudio de los sistemas vivos, que desafía incluso la frontera de la vida conocida y se lanza a la exploración de exoplanetas, la búsqueda de inteligencia extraterrestre, la terraformación y otros programas semejantes, pero contiguos. En el centro de este panorama se erige, con estatuto propio, la vida artificial y la inteligencia artificial, que modifican por completo, aunque lentamente, el panorama social gracias a la cuarta Revolución Industrial en marcha.

Como resultado de lo anterior, quisiera destacar la heurística de la comprensión y el estudio de la vida. Se trata de la articulación de la dúplice perspectiva de: i) la vida tal-y-como-la-conocemos, y ii) la vida tal-y-como-podría-ser-posible. El origen de esta doble perspectiva se origina, como es sabido, en el ámbito de la vida artificial, que no es otra cosa que un programa de investigación con base en la computación, cuya finalidad es simple y llanamente entender los dos problemas fundamentales en este contexto:

- La lógica o la naturaleza de la vida: al día de hoy, hemos ganado mucha luz acerca del primer problema al que denominaremos *PI*. Se sabe que el sistema solar y la Tierra misma nacen hace alrededor de 4500 millones

de años; la vida aparece, tal y como la conocemos, hace 3800 millones de años. Vale destacar que el universo se calcula en una existencia de 13 800 millones de años, lo que significa que el surgimiento de la vida le tomó al universo cerca de dos terceras partes de su existencia, un motivo de reflexión del cual nos ocuparemos. Existen diversas teorías acerca del π , pero la más robusta hasta la fecha sostiene que lo que sucedió fue un proceso de metabolismo mediante el cual la vida generó las condiciones de su propia aparición (*metabolism first*). Una idea, como se aprecia, perfectamente contraintuitiva, es decir, deja de ser cierto que debe haber primero condiciones de posibilidad, para que luego, emerja un fenómeno o se produzca un proceso. Dicho de manera escueta y franca: la vida aparece en el universo ya compleja, no como una agregación de elementos. La vida se funda, en síntesis. Gracias a este marco, podemos abandonar la creencia en la causalidad.

- Llamaremos a este segundo problema π : explicar la vida –esto es, qué son los sistemas vivos– puede ser allanado gracias, sugerimos, a lo que hacen los sistemas vivos. Existen muy robustas explicaciones al respecto, y quizás la más consolidada es la teoría de la evolución. Los sistemas vivos son tales gracias a que, de entrada, logran superar –como puedan–, las restricciones impuestas por la selección natural, y de salida, consecuentemente, se adaptan. El eslabón (perdido) entre la entrada y la salida es el aprendizaje, en

otras palabras, el aprendizaje es condición de posibilidad para la adaptación.

Pues bien, queremos dejar de manifiesto que la mejor explicación disponible acerca de la naturaleza de la vida es la biología cuántica, y esta permite ampliamente resolver los problemas PI y PII. Este es el eje central de este trabajo.

1.

Dos problemas complejos

En buena ciencia no es suficiente formular un problema. Gracias a y a partir de la teoría de la complejidad computacional (TCC) es necesario precisar, además, el tipo de problema de que se trata. Así, por ejemplo, la TCC permite establecer si hablamos de problemas decidibles o indecidibles, y si, adicionalmente, el problema en cuestión es P o NP o alguna otra variación, o si supone un espacio P, un espacio EXP, o algún otro. No todos los problemas son complejos, e incluso, en determinadas ocasiones, no es preciso que lo sean. Los problemas PI y PII son problemas complejos en el sentido preciso de la TCC.

De acuerdo con la TCC, cabe distinguir dos grupos principales de problemas: decidibles e indecidibles. Los problemas indecidibles son aquellos para cuya solución no existe ningún algoritmo o, lo que es mejor, no pueden ser resueltos de manera alguna con base en algoritmos, independientemente de su tipo, y con independencia del tiempo, el espacio o los recursos disponibles. Por su parte, los problemas decidibles se dividen en problemas P versus NP, y esto se constituye uno de los problemas del milenio, de acuerdo con el Instituto Clay (Carlson, *et al.*, 2006). A su vez, los problemas P versus NP tienen otras clasificaciones que no ahondaremos aquí para no desviarnos de lo que nos interesa.

Explicar y resolver los problemas PI y PII forma parte de los problemas complejos en el sentido preciso de la TCC; esto es, problemas que admiten más de una solución posible y que no admiten, en modo alguno, ningún algoritmo, en cualquier acepción de la palabra. Algunos ejemplos de problema indecidibles son: el conocimiento, la naturaleza, la salud, la equidad, la pobreza, y, quiero decirlo de manera expresa: la naturaleza de la vida, que no es sino el título que abarca a PI y PII.

Según Maldonado (2016), es posible resolver el *PI* por vía de solución de *PII*. En otras palabras, si logramos explicar lo que *hacen* los sistemas vivos para vivir, podremos avanzar en la resolución acerca del origen de la vida. Esta línea de trabajo implica el cambio de una comprensión ontológica de la vida (¿qué es la vida?) por una comprensión de la vida en términos de procesos. Dicho en otras palabras, abandonamos la tradición platónica-aristotélica por un enfoque de la vida en términos de complejidad, es decir, de procesos, cambios o transformaciones; al fin y al cabo, el surgimiento de la vida tal-y-como-la-conocemos significó, en cualquier plano que se quiera considerar, la mayor transformación del universo o la naturaleza.

Pues bien, el libro fundamental de Schrödinger consiste exactamente en esto: identifica un problema –que es bastante más que una *simple* pregunta– y la resuelve con la mejor herramienta teórica o conceptual disponible en su momento: un enfoque o comprensión gracias a la física cuántica, más exactamente, mediante el recurso a la mecánica cuántica. Dicho sin ambages, la vida es ese fenómeno, sistema o comportamiento que transforma fenómenos abióticos en fenómenos bióticos. La masa (siglo XVIII), la energía (siglo XIX) o la información (siglo XX) son los tres ejes históricos para comprender la materia (siglo XVIII) (o el *stuff* o *hylé*) en vida. La vida es *causa sui*, y transforma el entorno en condiciones favorables para ella misma (Canfield, 2016; Dartnell, 2019). En otras palabras, podemos dejar de pensar en términos de causalidad y, por consiguiente, de inicio, proceso y final.º

2.

**La vida: un fenómeno
alejado del equilibrio
o en el filo (¿del caos?)**

La vida se encuentra en un extremo que puede ser dicho de cuatro maneras distintas, así: la vida existe en el límite, en la frontera, en el filo, o también en el umbral -del mundo cuántico. Esto significa exactamente que la vida es un fenómeno cuántico -una segunda idea contraintuitiva-, para lo cual se impone tener una idea esencial sobre lo que es la física cuántica, que fue la que sentó las primeras bases para el estudio de fenómenos y comportamientos cuánticos. Me ocupo de esto en la siguiente sección. Aquí, por lo pronto, se trata de explicitar ese modo que se dice de dos maneras que es la vida; la vida-tal-y-como-la conocemos y la vida tal-y-como-podría-ser-posible.

En la historia de la ciencia la primera vez que aparece la idea según la cual los fenómenos más apasionantes del universo suceden lejos del equilibrio es con la termodinámica del no-equilibrio, particularmente gracias a Prigogine (1980). Una observación histórica se impone aquí. Prigogine se hace merecedor del premio Nobel de Química por sus contribuciones al desarrollo de la termodinámica del no-equilibrio y por haber introducido en la ciencia lo que esta no tenía: el tiempo, esto es, la flecha del tiempo -como un factor creativo. Prigogine es usualmente reconocido como el miembro más destacado de la Escuela de Bruselas, junto con G. Nicholis, y la termodinámica del no-equilibrio ha sido llamada la segunda de las ciencias de la complejidad, luego del caos, formulado originariamente por E. Lorenz, pero que adquiere carta de nacionalidad, por así decirlo, después de 1977.

Sin embargo, prigogine no hubiera sido posible sin las contribuciones de L. Onsager (1976), quien es conocido solo en una historia menos gruesa de la ciencia, y que, a su vez, recibió el premio Nobel de Química en 1968 por sus contribuciones sobre las propiedades de superfluidos en el helio líquido y el modelo de Ising en dos dimensiones. Por

lo demás, la Escuela de Bruselas no hubiera sido posible en absoluto sin las contribuciones de Th. De donder, quien es exactamente el padre de la termodinámica del no-equilibrio, y quien participó en la famosa conferencia Solvay de 1927.

Ente tanto, la vida implica cualquier cosa menos equilibrio y, por consiguiente, cualquier otro concepto o término que se ajuste o coincida con “equilibrio” –por ejemplo, “estado”, “estabilidad”, “permanencia”, “ser”, u otros próximos y semejantes–. Es posible reconocer este rasgo de tres maneras: los sistemas vivos viven y se hacen posibles alejados del equilibrio, en el filo del caos, o a través de incesantes procesos de equilibrios dinámicos o equilibrios puntuados, en fin, inflexiones.

En el lenguaje propio de la cuántica cabe decir que los sistemas vivos se encuentran en el filo del mundo cuántico, en ese umbral entre el mundo cuántico y el mundo clásico. No obstante, quiero decir que no cabe entender a la vida como un fenómeno casi-cuántico (*quantum-like*). Radicalmente, la vida es un fenómeno cuántico en cuyo límite aparece el mundo clásico, pero, manifiestamente, y contra la casi totalidad de las comprensiones habidas hasta el momento, la vida definitivamente *no* es un sistema clásico.

En el contexto tanto de la física cuántica como de la biología cuántica se han empleado dos metáforas que son perfectamente adecuadas para entender lo que es la vida en general y lo que hacen los sistemas vivos. Estas dos metáforas son: danza cuántica y teatro clásico. La segunda metáfora quiere significar que los sistemas vivos se comportan como un teatro clásico, pero que en realidad son una danza cuántica. Dos figuras literarias hermosas y, por decir lo menos, novedosas (McFadden y Al-Khalili, 2019; Zeilinger, 2010).

Entonces es posible afirmar que la vida vive en el límite cuántico, con el reconocimiento de que el mundo

cuántico es altamente afinado, y que el mundo clásico se caracteriza manifiestamente por complejidad creciente; la vida vive gracias al mundo cuántico y se nutre de él; pero es el mundo clásico el que hace que conozca la muerte y la finitud. Dicho en el lenguaje de las ciencias de la vida y de la salud: la salud es posible gracias a comportamientos cuánticos, y la enfermedad tiene lugar debido a las características propias del mundo clásico. La dificultad de esta comprensión consiste en que hacer pensar que existen dos mundos, el cuántico y el clásico, lo cual es falso. Existe un solo mundo, y el mundo clásico es un caso límite del mundo cuántico.

Pues bien, los dos problemas fundamentales: el origen de la vida y la lógica de la vida, esto es, qué hacen los sistemas vivos para ser tales. Estos exigen ser abordados y resueltos -con la heurística ya mencionada- con el reconocimiento de este rasgo esencial: los sistemas vivos viven en el límite -cuántico, y viven mientras logran mantenerse en dicho límite. La forma como se mantienen en él es a través de diversos mecanismos, entre los cuales se destacan la homeostasis, los procesos de metabolización, las dinámicas de alimentación. Para los seres humanos, todo ese complejo entramado es la cultura y la historia, esta idea comporta el cruce entre la biología cuántica y las ciencias sociales cuánticas. Aquí solo podemos señalarla (cfr. Maldonado, 2019).

Clásicamente, a partir de Boltzmann e, incluso, de Prigogine, se llegó a pensar que la vida no era más que termodinámica compleja. En otras palabras, que la vida era el resultado y la respuesta a la entropía. Supuesto el principio de existencia de energía libre, la preocupación principal era la de la tendencia a la complejidad creciente, y muchas explicaciones y sólidos argumentos se aportaron al respecto (Lineweaver *et al.*, 2013). Todas las teorías con respecto al

PI fueron de origen químico, en general, y bioquímico y químico-físico, en particular. Se trató del misterio del tránsito de la química inorgánica a la química orgánica, una química que se ocupó de fenómenos en el mundo clásico. Habrá que esperar al nacimiento de la química cuántica, lo cual, sin embargo, permitirá una precisión de orden histórico.

En cada momento es lo mejor de la ciencia disponible lo que sirve de basamento para explicar el mundo o una parte del mundo, según el caso. La mecánica clásica sirvió para explicar un mundo basado en materia y sus dinámicas y, más exactamente, el más conspicuo de sus desarrollos, la mecánica estadística. (En el plano de las ciencias de la salud, la Epidemiología es hoy la voz de la mecánica estadística). La verdad es que la mecánica clásica sirvió de muy poco para los problemas PI y PII. Fue la Química la que mejor contribuyó a ellos, y se debió justamente a los avances alcanzados por la Química a despecho de la Física: físicos y químicos estuvieron discutiendo un largo tiempo acerca de sus independencias y estatutos.

Pues bien, la Química allanó ampliamente el camino, sin la menor duda, para el descubrimiento de la vida, la cual, al ser un fenómeno físico, es bastante más y diferente a la Física. Todo estaba servido para el paso siguiente: la revolución en el seno mismo de la Física, que fue la cuántica. Esta produjo el más grade cisma en la historia de la humanidad occidental desde el punto de vista de la estructura de la racionalidad. Mientras que, *grosso modo*, toda la historia de Occidente se fundó en lo sentidos y en la percepción natural para explicar el universo alrededor, con la cuántica accedimos a explicaciones y comprensiones que contravenían radicalmente la importancia de los sentidos y la percepción natural. Si hoy, por ejemplo, podemos decir que tan solo conocemos el 4 % del universo que consiste en materia bariónica, sencillamente no sabemos qué sea el

96 % restante, y se lo denomina, en proporciones disímiles, energía oscura y materia oscura. El conocimiento avanza, en cada caso, con lo mejor disponible.

Así las cosas, la Física clásica no sabe de límites, la vida se explicó en un momento dado mediante la Química, y ella, en este plano, es solo termodinámica. Asistíamos así, al equivalente de la reina de corazones en Alicia en el país de las maravillas, que siempre está moviéndose y agitándose alrededor de un mismo sitio, sin avanzar en ningún sentido.

En ciencia, en numerosas ocasiones, la mejor manera de resolver un problema consiste en cambiar el foco del problema. Contra todas las apariencias, no en profundizar, afinar los datos, conocer otras fuentes en la elaboración del estado del arte, en hacer avances parciales de la investigación o en generar redes de cooperación o ampliar las ya existentes. Pues bien, la biología cuántica permite comprender el origen de la vida sin tener que pasar por la Química. Es preciso entonces girar la mirada hacia aquella.

2.1 Biología cuántica: una transformación de la Física

Tan pronto como nace la física cuántica –esto es, el estudio de fenómenos y comportamientos cuánticos en la naturaleza física–, esta se consolida en un robusto aparato matemático –que es la mecánica cuántica–, y casi inmediatamente emergen los primeros cimientos de la química cuántica –gracias a W. Pauli, hacia 1932– y la biología cuántica –con E. Schrödinger en 1944–. La consecuencia inmediata no puede ser obliterada: la naturaleza es bastante más que la Física, y la Física es perfectamente inseparable de la Química y la Biología, pero en el contexto específico de la cuántica. A la

limite, la naturaleza no sabe de distinciones ni de divisiones de ciencias y disciplinas. La Física deja así de tener una actitud y un estatus predominante entre las ciencias, algo que solo debe preocupar a los físicos (clásicos).

Así las cosas, en el panorama científico se creyó que la biología cuántica era un campo reciente que había nacido a comienzos del siglo xx. Diversos textos en fuentes prestigiosas así lo ponen de manifiesto (Ball, 2011). Sin embargo, una mirada en profundidad amplía enormemente la ventana (McFadden and Al-Khalili 2018). En efecto, los sistemas vivos hacen uso de numerosos rasgos no-triviales que estudia y sistematiza la mecánica cuántica. Siguiendo el artículo de McFadden y Al-Khalili¹, bien vale la pena destacar los hitos centrales en el nacimiento y desarrollo de la biología cuántica².

Antes del libro de Schrödinger de 1944, P. Jordan publicó en 1941 un texto con el título *physics and the Secret of Organic Life*, en el que se interroga si los fenómenos, principios y comportamientos cuánticos serían relevantes para comprender los sistemas vivos. Jordan –quien fue el único de los fundadores de la física cuántica que no recibió un premio Nobel por razones que tienen que ver directamente con sus vínculos con las ideas y acciones del nacionalsozialismo– había venido reflexionando sobre el tema por lo

¹ El artículo es una profundización detallada y el fundamento mismo de lo que, a nivel de divulgación, ambos autores presentan en su libro de 2019, publicado originariamente en 2014 con el título: *Life On the Edge* (La vida en el filo, literalmente).

² Para una visión sucinta, y no necesariamente técnica, pero no de orden divulgativo de la biología cuántica, véase Huelga & Plenio (2013).

menos desde la década de 1930. De hecho, él es el primero que acuña la expresión “biología cuántica”.

No solamente Jordan se vio personalmente afectado ante la historia de la ciencia por no recibir el premio Nobel a diferencia de todos los demás. Asimismo, la expresión “biología cuántica” se vio salpicada de sospechas de ideología nazi y tuvo que esperar muchos lustros antes de nacer. Como se recordará, los nazis amplificaron las ideas y prácticas que habían nacido en los EE. UU. Sobre eugenesia y otros temas relacionados. En medio de estas circunstancias, su libro pasa casi totalmente desapercibido en la historia de la ciencia. Este sería un factor que jugó a favor del libro de Schrödinger. Como es suficientemente conocido en la historia de la ciencia en general, el éxito o fracaso de un autor o de un libro depende del cruce, sutil, entre historia interna y la historia externa de la ciencia. Este reconocimiento preciso marca todo el destino del nacimiento y desarrollo de la biología cuántica.

En el plano experimental –recordemos que el Círculo de Viena había acuñado la idea de una “filosofía experimental” (Stadler, 2010) –, no sin los aportes originarios de Hooke (1665) en torno a la micrografía, H. J. Muller en 1927 había trabajado en la mutagénesis a partir del descubrimiento y las aplicaciones de los rayos X, mientras que T. Svedberg había trabajado en los pesos atómicos de las proteínas a partir de sus investigaciones sobre centrifugación, ya D. M. Stanley en 1935 había investigado sobre la cristalización de los virus. Sin embargo, no todo el mundo estaba convencido de que la Física y la Química pudieran explicar los fenómenos biológicos de manera sólida. N. Bohr era uno de estas voces que disientían. Esta duda (¿razonable?) alteraría los ritmos del desarrollo del tema.

En esta historia es importante señalar la importancia de la síntesis neodarwiniana que se estaba produciendo entre los años 1930-1940, con Mayr, Fischer, Haldane,

Dobzhanski y otros. En este contexto, un capítulo propio lo ocupan los organicistas –notablemente von Bertalanffy, y unos años más tarde, von Foerster–, quienes cumplen un papel muy destacado y alternativo contra el mecanicismo, por una parte, y el vitalismo, por el otro. Aquí podría hacerse una reflexión acerca de los estilos de pensamientos nacionales o culturales, pero esto debe quedar para otra ocasión.

Antes de su libro de 1941, en 1932 Jordan había publicado un artículo que vinculaba mecánica cuántica, Biología y Psicología, llamado “La mecánica cuántica y los problemas fundamentales de la Biología y la Psicología”. Allí, de acuerdo con las ideas organicistas, señala que la probabilidad y el azar son las reglas desconocidas que sostienen a la vida, dos ideas clave de cuño cuántico.

En esta historia, M. Delbrück, ganador del premio Nobel de medicina en 1969, puede ser legítimamente considerado como el padre de la biofísica. Él constituye otro de los escalones hacia la biología cuántica, específicamente a partir de sus estudios sobre las mutaciones genéticas con base en fenómenos subatómicos. Físico de formación, significativamente se interesa en Biología gracias a la influencia de Bohr, Schrödinger, Heisenberg y Jordan.

McFadden y Al-Khalili observan cómo el Club de Biología Teórica de Cambridge cumple también un papel destacado en esta historia. Entre sus miembros se destacan Haldane, Waddington y F. G. Hopkins (premio Nobel de medicina en 1929), que fue uno de los descubridores de las vitaminas. Los miembros del Club avanzan no solamente en el estudio de las relaciones entre Física, Biología y Química, sino que, además, están abiertos a las perspectivas organicistas: llevan a cabo parte de la síntesis que conducen al neodarwinismo, y exploran varias de las implicaciones filosóficas del tema de base: la naturaleza de la Física y la naturaleza de la Biología.

Waddington, formulará la idea de los paisajes epigenéticos, con lo que sienta las bases para el posterior nacimiento de la epigenética. En resumen, para nadie en la época que trabajara en investigación de punta le eran ajenos los temas relativos a las implicaciones de la física cuántica para el estudio de la vida. La genética había nacido y se había consolidado unos años antes, y el panorama intelectual se debatía con vivacidad. Contra todas las apariencias, la Física en general –la teoría de la relatividad, la física cuántica y el nacimiento contemporáneo de la física atómica o nuclear– no era el único foco de preocupaciones. La Química y la Física daban claras señales de vitalidad, por mencionar tan solo a las ciencias más contiguas en el espectro de las llamadas Ciencias naturales.

Como quiera que sea, el mérito fundacional de la biología cuántica se encuentra programática, heurística y conceptualmente en Schrödinger, y todo con una idea capital: el orden procede del orden, que es, si cabe, la idea mitocondrial del físico austríaco. No obstante, McFadden y Al-Khalili (2018) son explícitos en señalar que ni siquiera cuando cincuenta años después de publicado *¿Qué es la vida?* en un seminario de celebración, ninguno de sus participantes supieron ver el verdadero significado de las ideas del físico austríaco (cfr. Murphy y O'Neill, 1999). Digamos, de pasada, que algunos de los participantes en el seminario, realizado en el Trinity College en Dublin, incluían figuras de la talla de S. J. Gould, J. Diamond, S. Kauffman, M. Eigen, J. Maynard Smith y E. Száthmary, Ch. de Duve y R. Penrose. Más de un motivo de reflexión puede desprenderse de este reconocimiento. En el seminario en mención se vieron muchos otros aspectos, pero jamás la impronta cuántica de la Biología. Esta observación exige una puntualización.

Tres ideas centrales hay que destacar de Schrödinger, en la fina lectura de McFadden y Al-Khalili. Estas son:

primero, la importancia del concepto de información en la explicación de la vida; segundo, la idea de que el orden procede del orden, con lo cual se quiere llamar la atención sobre el papel que juegan las leyes estadísticas en el funcionamiento de los sistemas vivos, y tercero, el hecho de que los saltos cuánticos pueden ser entendidos como tunelamiento cuántico a nivel de los procesos orgánicos. Volveremos sobre estas tres ideas.

Por otro lado, el libro de Schrödinger tuvo amplias consecuencias sobre la formación y las investigaciones de Watson y de Crick. Sería, sin embargo, más fuerte la influencia en las investigaciones de P. O. Lödwin sobre el efecto túnel en las bases tautoméricas. Con todo, es en 1962 cuando con mayor firmeza se expresan las dudas acerca del tema gracias al artículo de Longuet-Higgins llamado “Mecánica cuántica y Biología”. Allí, de manera abierta y directa se sientan las dudas más fuertes que sintetizan todo un período para trazar el puente entre dos extremos.

Digamos, sin ambages, que el desarrollo de la ciencia no es posible, en absoluto, al margen de la dúplice perspectiva de la historia de la ciencia, tanto como de la Filosofía de la ciencia. La ciencia no es, en manera alguna, un asunto de debates entre conceptos, ideas, métodos, experimentos y aproximaciones. De manera ampliamente más compleja, la ciencia en general es el resultado del cruce entre factores internos y externos. El debate entre internalismo y externalismo, introducido originariamente por Lakatos, constituye un acervo fundamental. Ya en un texto tardío, el propio Kuhn (1996) así lo reconoce: los factores internalistas y los externos (o externalistas) constituyen las hebras mismas del desarrollo científico.

2.2 La vida es un fenómeno de nivel cuántico

Esta es la conclusión a la que arriba Schrödinger en 1944. Una conclusión bastante más profunda que la que una lectura superficial haría creer, y que sostiene que la vida es simple y llanamente neguentrópica.

La física cuántica, primero; posteriormente la química cuántica, y finalmente, la biología cuántica –tres modos de un solo y mismo tema– ponen de manifiesto que la materia –o la energía, o, incluso, la información– en su nivel fundamental (cuántico) es altamente ordenada. Una idea contraintuitiva, ciertamente, pero, por ello mismo, muy ordenada. Un orden sutil, como ha sido puesto de manifiesto numerosas veces³.

Pues bien, sugiero la figura improvisada de un viaje en tren, a través de diferentes estaciones a fin de comprender la naturaleza cuántica de los sistemas vivos. El sentido de las diferentes estaciones es el de presentar y discutir brevemente los ejes conceptuales de la biología cuántica. Hay que decir, por lo demás, que lo que prima ampliamente en los trabajos sobre el tema es una extensa fenomenología de procesos y comportamientos cuánticos en los sistemas vivos. Como se dice usualmente en la bibliografía especializada sobre el tema, se trata del estudio de efectos cuánticos en los sistemas vivos. Cada vez se descubren y se mejoran los descubrimientos en este campo.

³ En verdad, en la realidad convencional estamos acostumbrados a ver y hablar de desorden, de anomia, caos y crisis en numerosos planos, contextos y dimensiones. Podría decirse que toda la historia de la ciencia, la Filosofía, las Artes e, incluso, la religión, gira en torno a la ausencia del orden, a la fragilidad del orden, en fin, a la búsqueda anhelada de un orden que no se resquebraje y permanezca.

La primera parada en un viaje que conduce a la biología cuántica es el estudio de las enzimas. Estas pueden reconocidas como los motores de la vida dado que su función consiste en acelerar o catalizar todo tipo de reacciones bioquímicas. Ya Kauffman (1993) habla con acierto de adaptación en el filo del caos, y esta adaptación es el resultado de redes catalíticas y autocatalíticas. Estas redes son la obra de las enzimas.

La variedad de enzimas es amplia en los sistemas vivos. Existen las oxidoreductasas, que llevan a cabo reacciones de transferencia de electrones; las tranferasas, que se encargan de la transferencia de un grupo de átomos de una molécula a otra; las hidrolasas, cuya función consiste en la ruptura de enlaces con la participación de agua, o hidrólisis; las liasas –que llevan a cabo rupturas de enlaces mediante mecanismos distintos a la hidrólisis; las isomerasas, que se encargan de la introconversión de un isómero en otro, y las ligasas, que llevan a cabo reacciones de formación de enlaces con aporte de energía por ATP. Cada una de estas clases se componen de numerosos otros tipos. La tabla 1 presenta una visión sucinta al respecto.

Como se observa, el espectro de conceptos y procesos remiten inmediatamente a comportamientos de tipo cuántico; precisaremos enseguida este comentario. Un rasgo determinante de las enzimas merece ser mencionado. Los organismos mismos tienen una característica fundamental: la reparación; la reparación de células, de tejidos, incluso de órganos. Se calcula que cada día los seres humanos perdemos entre 30 000 y 40 000 células, lo que significa que la cantidad de células que mueren en un año equivale a la masa corporal que cada quien tiene. La vida es un incesante proceso de recreación del organismo por parte de sí mismo. Pues bien, la enzima colagenasa es la responsable de los procesos de reparación de las células.

Tabla 1. Enzimas y tipos de reacciones catalizadas

Clase	Tipo de reacción catalizada	Ejemplo
Oxidoreductasas	Transferencia de electrones (óxido-reducción)	Citocromo oxidasa
Transferasas	Transferencia de grupos de átomos	Hexoquinasa
Hidrolasas	Reacciones de hidrólisis (rotura de enlaces mediante adición de agua)	Tripsina
Liasas	Adición de grupos a dobles enlaces o formación de dobles enlaces	Piruvat descarboxilasa
Isomerasas	Transferencia de grupos en una misma molécula, mediante la generación de isómeros	Triosa-fosfato isomerasa
Ligasas	Formación de enlaces con gasto de ATP	Glutamino sintetasa

Fuente: elaboración propia.

Puede decirse que la “fuerza vital” no es otra cosa que un tipo de catálisis química. En términos más precisos, las enzimas son las responsables de la digestión, la respiración, la fotosíntesis y el metabolismo. Así las cosas, la mecánica cuántica contribuye sustancialmente a entender lo que McFadden y Al-Khalili (2019) denominan la vitalidad de la vida.

La razón estriba en el hecho de que la vida de la biosfera está constituida, en su mayoría, por sustancias químicas que son bastante estables y muy poco o nada reactivas. La materia en general se caracteriza por una inevitable turbulencia molecular. Pues bien, las sustancias químicas no se rompen por esta turbulencia. El siguiente dato es determinante: “el tiempo que tardan la mitad de los enlaces peptídicos de una proteína en romperse, lo que se conoce como la vida media de la reacción, es de más de quinientos años” (McFadden y Al-Khalili, 2019, p. 112). La vida es un fenómeno altamente ordenado. El orden procede del orden, en efecto. A su manera, en otro contexto, J. Holland (1995) hablaba ya de un “orden oculto”, solo que él sugería estudiar la emergencia de orden oculto mediante simulaciones computacionales.

En otro plano, reacciones que podrían tardar sesenta millones de años se completan en el organismo vivo en cuestión de nanosegundos. Dicho de manera puntual, los sistemas vivos resuelven problemas de enorme complejidad –digamos NP, NP duros y NP difíciles, en referencia a la teoría de la complejidad computacional– como si fueran problemas P. Este aspecto ha sido denominado hipercomputación biológica (Maldonado-Gómez, 2015; Maldonado, 2018a). La hipercomputación biológica es la aproximación computacional de los procesos metabólicos, por ejemplo, catalíticos y autocatalíticos, que tienen lugar en el mundo cuántico.

Los dos procesos de mayor complejidad en la biosfera son la fotosíntesis y la respiración, ambos realizados por enzimas. Con respecto a la respiración, esta no sucede en los pulmones, sino en cada célula, en la mitocondria, y es el resultado de una transferencia ordenada de electrones mediante un relevo de enzimas respiratorias. Los pulmones son sencillamente episódicos, esto es, instrumentos de aspiración y expiración, pero no para la respiración. Ganamos en profundidad y, entonces, en complejidad.

Una segunda estación es el efecto de túnel cuántico, sin la menor duda, uno de los descubrimientos más importantes en el seno de la mecánica cuántica. Contra todos los aprendizajes realizados en el mundo clásico, es perfectamente posible que una partícula atraviese una barrera, por ejemplo, un paisaje energético. Cuanto más ligera es la partícula, tanto más fácilmente atravesará la barrera. Esto es conocido como el efecto de túnel cuántico. Es más, no solamente una partícula, también un cuerpo puede atravesar cualquier barrera, para lo cual, lo único que se necesita es que todos los constituyentes del cuerpo se muevan al unísono. En esto exactamente consiste la coherencia cuántica. La misma ha sido llamada en numerosas ocasiones como un sistema “afinado”. El tema remite a un capítulo técnico que se denomina osciladores armónicos.

El mundo cuántico es, *grosso modo*, un oscilador armónico. Por vía de contraste, la decoherencia cuántica consiste en el hecho de que todas las ondas cuánticas dejan de moverse rápidamente al compás unas de otras y des hacen el comportamiento coherente. Esto ha sido llamado el colapso de la función de onda. Entonces, las barreras se convierten en verdaderos obstáculos o atolladeros físicos. Un autor destacado habla de este tema como una danza de fotones (Zeilinger, 2010). Al respecto, vale observar de manera puntual que:

- a. la materia consiste en ondas y partículas, y el átomo está esencialmente vacío;
- b. la energía consiste en vibraciones, pulsaciones, ondas, frecuencias, luz;
- c. la información consiste en ondas, frecuencias, vibraciones, códigos. Digamos, de pasada, que la inmensa minoría del universo está compuesta por cuerpos sólidos. El mundo está hecho esencialmente de vacío.

Pues bien, el interior de una enzima consiste en una danza coreográfica. Esta danza es el fundamento mismo de la vida, pues es lo que sucede en el mundo cuántico o también, en el límite cuántico. En su presentación más elemental, las células están compuestas de una membrana y el interior de la membrana. El efecto túnel tiene lugar ya desde la membrana misma, pero continúa teniendo lugar a nivel de las enzimas y los cromosomas. El interior de una célula es un abarrotado sistema altamente ruidoso y con constantes turbulencias y perturbaciones. Este es el medioambiente de la mitocondria y los demás aspectos constitutivos de la célula (Lane, 2005). Es esa cantidad de movimientos aleatorios y “ruidos” los que dispersan y perturban la delicada coherencia cuántica. Las enzimas hacen y deshacen sin cesar las moléculas de la vida: las grasas, el ADN, los aminoácidos, las proteínas, los azúcares gracias a numerosos procesos de efecto túnel.

Estos descubrimientos han sido realizados desde la Biología, no desde la Física. Así las cosas, la Biología ha llegado a enriquecer a la Física de una manera jamás imaginada. Esta idea es repetida en varias ocasiones por McFadden y Al-Khalili (2019) como una muestra de regocijo de una ciencia que fue atávicamente subvalorada como ciencia fundamental por parte de la Física. Digámoslo sin ambages:

la biología cuántica pone al descubierto fenómenos que la mecánica cuántica desconocía y enriquece así a la propia física. Podemos empezar a dejar de pensar en jerarquías de ciencias y disciplinas. La naturaleza conoce algunos trucos que los físicos desconocen (Ball, 2011).

En verdad, queremos subrayar esta idea: no existen jerarquías de ciencias o de conocimientos a nivel tanto de las ciencias de la complejidad como de la teoría cuántica. La Biología podría, incluso, ser considerada como ciencia más determinante, algo que, en otro contexto, sería suscrito por autores como Baluska, Mancuso y Volkmann, quienes trabajan en neurofisiología de las plantas (Baluska, *et al.*, 2006; Mancuso, 2015). Por lo pronto, podemos dejar esta observación como un asunto pasajero.

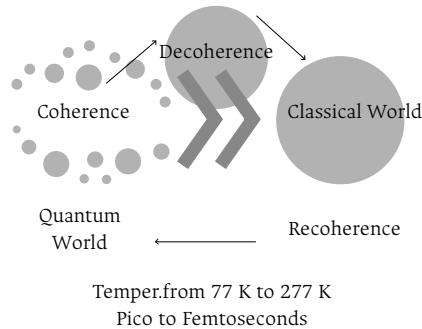
La tercera estación es la dualidad onda-partícula, un fenómeno suficientemente estudiado a partir del experimento originario de Th. Young en 1801. De todas las reacciones bioquímicas, de lejos, la más importante es la conversión de materia y energía inorgánicas en vida, así: se trata de la conversión del agua, luz y aire en virus, bacterias, hongos, parásitos, microbios y toda la trama de la vida hasta los propios seres humanos. Ello es posible gracias a la dualidad onda-partícula, y es lo que la propia dualidad lleva a cabo. La vida, podemos decir, no es un asunto de naturaleza (en el sentido aristotélico de la palabra), sino de gradientes, cualidades, formas de organización o comportamientos; cuatro maneras para decir una sola y misma dinámica. El planeta no tiene vida, sino que está vivo. *À la limite*, el universo mismo está vivo, una conclusión ciertamente escandalosa cuando se lo mira con los ojos de la tradición⁴. Podemos obliterar esta conclusión provisionalmente.

⁴ Al respecto, cfr. Kafatos, Nadeau, 1990; Stapp, 2011; Kaufman, 2016; Maldonado, 2018.

La función de onda es un conjunto de números que define la localización de una onda o una partícula en términos probabilísticos en el espacio. Mientras que el mundo cuántico es el mundo de innumerables posibilidades, el colapso de la función de onda se desploma hasta una única posibilidad. Dicho radicalmente, el mundo cuántico es esencialmente libre (Conway and Kochen, 2011), mientras que en el mundo clásico solo existe, en cada caso, una (sola) posibilidad (por ello mismo lo mejor que cabe decir aquí es hablar de bifurcaciones). Una partícula u onda se encuentra en todas partes al mismo tiempo antes de la observación. Una vez que es observada, y entonces perturbada, se encuentra en un solo lugar. Pero cuando deja de ser observada, su evolución continúa desplegándose en todos los espacios al mismo tiempo. En fin, en el mundo cuántico todos los fenómenos interactúan consigo mismos.

Pues bien, la perturbación o la observación del mundo cuántico sucede en el organismo de manera ecológica: cada átomo en el cuerpo es observado por todos los demás átomos que lo rodean. Es así como emerge el mundo clásico y como, parcialmente, se mantiene (clásico). El mundo, en general, la naturaleza o el universo no son únicos, y principalmente el proceso de coherencia que se decoherentiza, que es la versión más estándar, introducida por Zurek en los años 1990. Antes bien, el mundo cuántico consiste en un proceso incesante de coherencia-decoherencia-recoherencia. La figura 1 ilustra este proceso.

Figura 1. Coherencia, decoherencia y recoherencia cuántica



Fuente: “A Quantum Coherence-Recoherence-Based Model of Reality”, en: *Neuroquantology*, 2018, 16(11), 44-48.

La decoherencia tiene lugar en tiempos que oscilan entre picosegundos y femtosegundos. La recoherencia sucede en las mismas escalas. Como se observa, el mundo cuántico es coherente. Si sufre un colapso, entonces se decoherentiza y da lugar a la realidad convencional o al mundo clásico. Sin embargo, esta no es la última palabra, pues, a su vez, se produce una recoherentización del mundo clásico. Este proceso ha sido observado espontáneamente y producido en laboratorio (Maldonado, 2018b).

La decoherencia no puede ser detenida de manera total; sin embargo, sí puede ser mantenida el tiempo suficiente para ser útil desde el punto de vista biológico. Este es lo que sucede con todos los efectos cuánticos observados en los seres vivos, tales como la magnetocepción, la orientación aérea, los procesos de olfacción e, incluso, el funcionamiento del cerebro (Maldonado, Gómez, 2014). Cada segundo, las plantas y microbios fotosintéticos de la biosfera captan una columna de luz, que salió del sol hace ocho minutos para fabricar unas dieciséis mil toneladas de

nueva materia orgánica (McFadden y Alk-Khalili, 2019). Así las cosas, podemos desprendernos de la comprensión de la vida fundada en la Química y en el vacío misterioso que es el tránsito de la química inorgánica a la química orgánica. La biología cuántica brinda la respuesta. Como se aprecia sin dificultad, avanzamos enormemente en dirección desde el PI al PII. El origen de la vida es un acontecimiento cuántico.

Pero existe una nueva estación. Se trata del paseo cuántico (*quantum walk*). Este es una estrategia de búsqueda o, también, de resolución de problemas consistente en una partícula llamada excitón, que se desplaza en una proteína siguiendo todas las rutas al mismo tiempo. Esto es lo que acontece exactamente en la fotosíntesis.

Hacia el año 2012 se pensaba que la coherencia y la recoherencia sucedían en ambientes muy fríos, de alrededor de 77° a 277° K. A partir del 2014, se estableció que ambos procesos tienen lugar a temperaturas ambiente; es el caso, por ejemplo, de la fotosíntesis, la oxidación, la magnocepción y otros fenómenos. Ahora bien, lo que es más importante para la comprensión integrada o transversal de los sistemas vivos es que se sabe que los animales y las plantas no son tan diferentes, la diferencia parece estar relacionada sencillamente con la fuente de alimentación.

Por otro lado, las biomoléculas se construyen a partir de electrones; pero a su vez, quemamos moléculas para captar electrones. Cabe decir que la vida aprovecha procesos cuánticos para vivir, a la vez que contribuye a la cuantización del mundo. No existe una frontera tajante, rígida e inmóvil entre la vida y la no-vida, una conclusión sobre la que habrá que volver una y otra vez. La vida protege los estados cuánticos y los aprovecha al mismo tiempo. “En realidad existe un único conjunto de leyes que rigen la manera en que el mundo se comporta: las leyes cuánticas” (McFadden y Al-Khalili, 2019, p. 189), con la excepción de la fuerza gravitatoria. Pero este es un tema que puede quedar en sus-

penso, provisionalmente. La vida parece abarcar los mundos cuántico y clásico. No pertenece a uno más que a otro y obtiene lo mejor de ambos. En un caso, energía e información; y en el otro, energía libre ampliamente disponible.

Quisiera detener la marcha para hacer una observación puntual. Tiene que ver con los sentidos. La neurofisiología de las plantas (Bauska *et al.*, 2006; Mancuso y Viola, 2015) ha dejado de manifiesto que las plantas poseen por lo menos veinte sentidos. Pues bien, la biología cuántica está dejando en claro que los animales, en general, tienen mucho más de diez sentidos, por ejemplo: la detección de campos magnéticos, el sentido circadiano, la detección de la presión del aire, la detección de la gravedad, la detección de diversos umbrales lumínicos, además, naturalmente, de los cinco comunes. El libro de Mcffaden y Al-Khalili, *Biología al límite. Cómo funciona la vida a muy pequeña escala* (2019), no se detiene particularmente en este punto, pero vale la pena ponerlo abiertamente sobre la mesa para eventuales consideraciones posteriores. El procesamiento de la información en la naturaleza, antes de e independientemente de los seres humanos, es significativamente más complejo que el procesamiento que la ciencia y la tecnología llevan a cabo.

La vida aparece apenas en 1944, pero en mucho menos de un siglo se han hecho descubrimientos y comprensiones que sobrepasan muy ampliamente todo lo que jamás se supo sobre el propio ser humano, por ejemplo, para no hablar sobre la biosfera y sobre los sistemas vivos. La preocupación distintivamente antropocéntrica puede decirse que fue un obstáculo para el desarrollo del conocimiento. Pero el descubrimiento de la complejidad de la vida está produciendo un giro como el que jamás había sucedido. Sin editorializar, podemos decir razonablemente que la historia jamás volverá a ser la misma. La atención se vuelca cada

vez más sobre el otro plano de la comprensión de la vida, a saber: la vida tal-y-como-podría-ser-posible.

Podemos entonces detenernos en la quinta y última estación: la consideración del entrelazamiento cuántico. Un doble tema aparece ante la mirada sensible: entrelazamiento y superposición. El entrelazamiento pone en evidencia que la regla en el mundo no es la localidad, sino, contra Einstein y todos a los que él representa, la no-localidad. La naturaleza no solamente se comunica en un sentido amplio, sino además se sostiene sobre la base del entrelazamiento.

Notablemente el estudio de la proteína criptocromo, que es un pigmento en los ojos de las aves e insectos que permite detectar tanto campos magnéticos como ritmos circadianos, funciona con base en entrelazamientos. Las aves tienen una visión magnética, y ella es el resultado de que, en dicha proteína, un par entrelazado de electrones pasa de un estado singletes a un estado de tripletes (entrelazamiento entre tres partículas), y viceversa, “muchos millones de veces por segundo” (McFadden y Al-Khalili, 2019, p. 271). El criptocromo ha sido observado en petirrojos, el pato canadiense, pollos, moscas de la fruta, y plantas, entre muchos otros sistemas vivos. La no-localidad ha estado ayudando a numerosos sistemas vivos a migrar en las estaciones, y a metabolizar procesos cuando es necesario, como es el caso de las plantas.

En una palabra, principios y comportamientos cuánticos se encuentran en la base de la adaptación de los sistemas vivos; McFadden (2000) ya había puesto este aspecto de manifiesto. Sin ambages, aprendemos la idea de evolución cuántica que, se aprecia ampliamente, es bastante más que una simple metáfora. Ningún autor ha contribuido como McFadden a la consolidación de la biología cuántica (cfr. Abbott *et al.*, 2008).

Tres datos merecen destacarse de manera puntual:

- i. la tasa de errores de copia de replicación del ADN, las mutaciones, es, por lo general, de menos de uno entre cien mil millones;
- ii. el genoma de nuestras células consiste en cerca de trescientos mil millones de letras genéticas;
- iii. la mecánica cuántica ha sido testeada, verificada, confirmada o falseada hasta el onceavo decimal: $g/2 = 1.0011659208(6)$

Pues bien, el significado de estos tres datos consiste en el reconocimiento de que la vida es un fenómeno altamente ordenado, que procede del orden y consiste en hacer posible el orden. Ciertamente, no un orden estático: he aquí un enunciado trivial. Un orden generador de dinámicas de complejidad creciente y, sin embargo, sin jerarquías. El orden de la vida descansa en cristales aperiódicos; los genes, en verdad, son cristales aperiódicos.

Ahora bien, la vida en general puede ser vista como un incesante proceso de lectura y relectura del código genético a lo largo de toda la vida de la célula. La enzima polimerasa del ARN, como la propia polimerasa del ADN, define con precisión las posiciones de los protones codificadores a lo largo de la cadena de ADN y se ocupa, por tanto, que las cosas marchen adecuadamente. A partir de lo que sabemos de física cuántica, la posición de los protones está garantizada por leyes cuánticas, con lo cual la conclusión no admite dilaciones: el código genético es un código cuántico.

Así las cosas, lo cierto es que la selección natural no produce ninguna novedad en la naturaleza, es sencillamente la forma como las cosas se mantienen o conservan. La fuente de la creatividad es, literalmente, más profunda: las mutaciones son el resultado del azar, y el azar es un

tema clara y distintivamente cuántico. Cuando un entorno cambia, una especie tiene que esperar a que se produzca la mutación adecuada que permita la adaptación al medioambiente. Si el tiempo de espera es demasiado largo, la especie tiende rápidamente a desaparecer. Así las cosas, la vida no domina al azar –un contrasentido total en los términos; el azar es, por definición, indomable–, y solo debe esperar a que las mutaciones adecuadas tengan lugar. Dependemos del azar, y entonces, naturalmente, de las mutaciones. He aquí una idea altamente contraintuitiva para un mundo acostumbrado a la necesidad. Es en este sentido que la vida existe en el filo –del caos, del azar, del mundo cuántico. Decía Heráclito: “solo quien espera, lo inesperado hallará”. Todo parece indicar que “allá abajo” la vida sabe esperar lo inesperado. El orden proviene del orden, pero aprovecha el azar.

Sin la menor duda, las mutaciones pueden ser consideradas de modo estricto como una especie de saltos cuánticos. Esto es, se trata de muy pequeños cambios –los mínimos posibles, absolutamente–, pero que tienen consecuencias de gran amplificación y son totalmente impredecibles. Una idea cara para la complejidad. Subrayemos lo siguiente: los procesos biológicos se fundan, desde el punto de vista de la biosemiótica, en tres rasgos: transcripción, traducción e interpretación. El gran supuesto de estos tres rasgos es la lectura y la escritura del código. Un código estable y, sin embargo, esencialmente abierto. Hay genes que son más leídos que otros, como sucede, de hecho, por ejemplo, en los lenguajes naturales. Hay, en otras palabras, unos comportamientos que son más constantes o repetitivos que otros. Una mirada a la epigenética subraya el reconocimiento que esta consiste exactamente en esto: transcripción, traducción e interpretación, y entonces, en herencia y transmisión. Casi que asistimos al *uroboro*, un sistema de orden sorprendente.

* * *

Hasta aquí hemos hablado genéricamente de los sistemas vivos en general. Sucede que los seres humanos forman parte de ese conjunto magnífico. Así las cosas, cabe decir que, concorde con lo que precede, el conocimiento de la mecánica cuántica es indispensable cuando se quiere entender lo que son los seres humanos. Una idea que puede resultar extravagante para quienes se formaron en las Ciencias sociales y humanas, pero que se adecúa perfectamente al desarrollo de la ciencia y de la investigación en general. La ciencia, en general, se hace en correspondencia con el estado del arte disponible en cada momento. De hecho, las ciencias sociales y humanas normales son y han permanecido hasta la fecha precuánticas; en el mejor de los casos, son relativistas, en el sentido de la teoría de la relatividad de Einstein (Maldonado, 2019). Digamos, en *passant*, que la medicina y las ciencias de la salud también son precuánticas, hasta el día de hoy. No obstante, esta situación puede cambiar, debe cambiar.

El conocimiento consiste en actos de unificación, en procesos de integración, en fin, en efectuación de síntesis. Esta es exactamente la función de la conciencia. Y en la conciencia, sin ninguna duda, es la imaginación la que lleva a cabo la función de unificación –de sensaciones, de conceptos, de experiencias. La imaginación no es simplemente asociativa; más exacta y radialmente, es creativa. La dificultad frente a toda la ciencia, la filosofía y las Artes habidos en Occidente estriba en que la conciencia fue siempre un epifenómeno. Como en el caso de Hegel en sus *Lecciones sobre la filosofía del derecho* (AM026) la conciencia es como el búho de Minerva, que siempre llega al atardecer; esto es, cuando las cosas ya han sucedido. Primero, siempre sucede el mundo, las cosas; y solo después se las entiende. En contraste, la teoría cuántica permite poner claramente a la luz del día

que la conciencia no es, en absoluto, un epifenómeno. Dicho de manera escueta: las ideas pueden mover la materia.

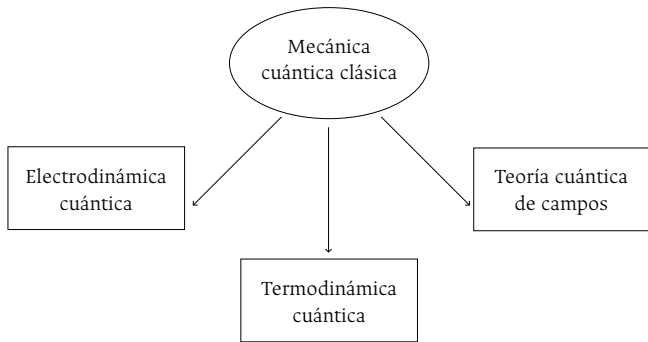
La fisiología y la histología ponen en evidencia, por ejemplo, que a través de la membrana celular hay en cada instante un gradiente de un millón de voltios por metro (McFadden y Al-Khalili, 2019). Hay que entender que el entrelazamiento es un paso más allá de la coherencia. Los procesos que entran en consideración, entonces, no son simplemente bits de información sino *qubits*, esto es, información cuántica, o lo que es equivalente, el procesamiento cuántico de información. Esta idea nos conduce a la importancia de la termodinámica cuántica sobre la cual nos ocuparemos más adelante. Mientras tanto, lo relevante consiste en el reconocimiento de que las síntesis o los procesos de unificación son el resultado del entrelazamiento. La coherencia cuántica es un componente esencial del proceso de pensamiento. Para ello, hay que decir que todo el volumen del cerebro lo ocupa su propio campo electromagnético. Pues bien, son los campos de energía los que pueden mover objetos. Los procesos de conciencia son, dicho en otras palabras, procesos de sincronía (afinamiento), lo cual nos recuerda la idea de osciladores armónicos. Más y mejor pensamiento no es otra cosa que más y mejor afinamiento de los campos cuánticos (Piotrowski y Stadkowski, 2008).

Resumiendo: un aspecto fundamental de la naturaleza de la vida es, además de su capacidad para repararse permanentemente, su capacidad de replicación. Sin embargo, los genes del ADN no se autorreplican; son las enzimas polimerasas del ADN las que lo hacen. Ahora bien, para la acción de las enzimas, el electrón o protón se encuentra simultáneamente a ambos lados de la barrera; y entonces se entrelaza y atraviesa, por efecto túnel, la barrera. Así, el mundo clásico está mediado por procesos cuánticos y se asienta sobre estos. La vida se hace posible, sin más, gracias a paseos cuánticos aleatorios (*quantum walk*). El pa-

seo cuántico es la función de onda que recorre todos los caminos al mismo tiempo y que se encuentra en todos los estados. El más sorprendente de todos los descubrimientos, hasta la fecha.

Como se observa, la extraña naturaleza de la vida consiste en, o depende de –como se prefiera– la extraña física, la biología y la química cuánticas. La cuántica nace como mecánica cuántica, pero esta conoce diversos desarrollos hasta la fecha. La figura 2 presenta de manera somera los principales ejes de este desarrollo:

Figura 2. Principales ejes del desarrollo de la mecánica cuántica



Fuente: Elaboración propia

Digamos que los cuatro ejes articuladores de la mecánica cuántica sirven como plataformas para el estudio de la biología cuántica.

3.

La mecánica cuántica, reconsiderada

La mecánica cuántica fue llamada así por sus fundadores porque tenían como referente inmediato a la mecánica clásica. Sin embargo, debe quedar suficientemente claro que no es mecánica, en ninguna acepción de la palabra. La cuántica es cualquier cosa menos mecanicismo. Por este mismo camino, la mecánica cuántica –hecha la salvedad sobre el término– fue un logro basado en la Física. Sin embargo, la biología cuántica⁵ ha llegado a hacer contribuciones determinantes al carácter cuántico del mundo. Dicho en sentido filosófico, la naturaleza es cualquier cosa menos física. Esto solo se lo creyeron la tradición aristotélica, Newton y Einstein, notablemente. La naturaleza es también, y muy fundamentalmente, un sistema animado (Maldonado, 2020).

Como señalan McFadden y Al-Khalili (2019): “la mecánica cuántica es normal. Es el mundo que describe lo que es extraño” (p. 399). El significado inmediato de esta observación estriba en la capacidad de distinguir el mundo del aparato que describe al mundo, una distinción que está muy lejos de ser obvia a la luz de la tradición. Lo que nos interesa es el mundo mismo; no la teoría que explica el mundo. Esta es una condición necesaria, pero nunca suficiente. Precisamente por ello, cabe, con toda legitimidad, hablar de complejidad, esto es, de indisciplinariedad del conocimiento.

Hasta el nacimiento y consolidación de la biología cuántica, los comportamientos cuánticos se habían alimentado de objetos clásicos y de objetos inanimados. La vida era estructurada y ordenada: contra la termodinámica clásica, era el más ordenado de todos los sistemas posibles e imaginables. A título exhortativo, debe ser posible una amplificación de la escala cuántica a la realidad convencional. Incipientes, ya hay varios trabajos que han comenzado a

5. En otro momento haré referencia explícita a la química cuántica.

avanzar en esta línea de trabajo (Haven, Khrennikov, 2013; Allan, 2018).

Por otro lado, los sistemas vivos no evitan las vibraciones y perturbaciones moleculares; antes bien, bailan a su ritmo. Esta es una idea que, aunque novedosa, atraviesa como un hilo conductor cada vez más, crecientes estudios. La vida es un fenómeno regido por el orden. La muerte es el triunfo del desorden (total). Solo que el orden de la vida aparece como múltiple, variable, en evolución. A la mejor manera de una parte de la sabiduría japonesa, cabe decir con propiedad que, en lugar de rehuir las tempestades, la vida las aprovecha: como el bambú que se inclina ante la borrasca. O, en otro plano, como Próspero en la última tragedia de shakespeare (*The Tempest*, 1611), esa tragedia que está muy lejos de ser tal.

Por todo ello, la vida tiene sus raíces en el mundo cuántico. Se yergue sobre el mundo clásico y lo crea, pero sabe que el mundo mismo es cuántico, no clásico. La naturaleza de la vida es, sin más, su capacidad autopoietica, autoorganizativa, autoreparadora, de incesante renovación y reinención. Quiero decirlo: no en otra cosa consiste la salud. Que no es sino una manera decir: el encuentro con y la creación de siempre incesantes posibilidades abiertas, numerosas, idealmente infinitas; posibilidades, en plural, a diferencia del mundo clásico. El mundo cuántico no sabe de límites, por eso mismo, la vida anida en él.

3.1 La complejidad de la biología cuántica

Los ejes para la comprensión de la complejidad de la vida consisten en un abanico compuesto por:

- i. *La biología computacional*. Se trata del recurso a herramientas computacionales de diversa

- índole para comprender fenómenos y procesos biológicos. Hoy por hoy, y cada vez más, es imposible hacer buena biología sin el recurso de las herramientas, técnicas, métodos y conceptos que aportan las Ciencias de la computación, que, en general, incluyen modelamientos y simulaciones. La biología molecular se inscribe en este contexto.
- ii. *La computación biológica.* Se trata del desarrollo de computación bio-inspirada, que sabe de biología y aprovecha conceptos y procesos biológicos para comprender problemas específicamente computacionales. Cabe decir en este punto que existen hoy cuatro formas de hacer ciencia: la ciencia por inducción, la ciencia de carácter deductivo, la ciencia por modelamiento y simulación, y la ciencia con base en el manejo de grandes bases de datos. Las dos últimas son, simplemente y llanamente, el aprendizaje de y el trabajo con lenguajes de programación.
 - iii. La teoría de la *simbiogénesis o endosimbiosis*. La vida no emerge y tampoco se funda y se hace posible (se desarrolla y evoluciona) con base en lucha, competencia y selección. Por el contrario, la regla en la naturaleza es la cooperación, la ayuda mutua, el comensalismo, el mutualismo, en fin, la eusocialidad. Antes que, de evolución, podemos hablar de coevolución. Pues bien, la vida es un muy complejo entramado de cooperación, una vasta y profunda red de codependencias recíprocas. Unos organismos se favorecen de otros, unas escalas, nichos y biomas son sensibles a otras más. Una expresión puntual de este hecho es

- el carácter holobionte de los mamíferos en general y de los seres humanos en particular. La naturaleza no sabe ni de jerarquías ni de centralidades.
- iv. *La biología de redes.* En estrecha conexión con el aspecto anterior, la biología de redes pone suficientemente de manifiesto que un gen no existe ni hace nada, como tampoco un virus o una bacteria, por ejemplo. La naturaleza se funda en redes variables en el tiempo y en el espacio, redes cuya arquitectura ha sido establecida como conformada por nodos, *hubs* y *clusters*. En el caso del ser humano, no es cierto ya que el cuerpo humano sea un organismo. Por el contrario, es un ecosistema que funge como interface entre un mundo microscópico y uno macroscópico, simplemente una interface.
- v. *La epigenética.* El mérito singular de la epigenética radica en poner de manifiesto que, contra toda la historia de Occidente, no hay dos cosas: naturaleza y cultura, sino una sola. Al igual que heredamos genes, asimismo heredamos experiencias; y así como transmitimos genes a través de cromosomas, de la misma forma, transmitimos experiencias. Hacia el año 2005 estaba establecido que heredamos y transmitimos genes y experiencias hasta tres generaciones hacia atrás y delante. Al día de hoy, la investigación ha puesto en evidencia que el proceso sucede hasta ocho generaciones.
- vi. *El enfoque eco-evo-devo.* Las tres dimensiones tradicionales de la Biología, a saber: la ecología, la biología del desarrollo y la biología

evolutiva estuvieron separadas en el pasado. Hoy está establecido que las tres se imbrican fuertemente y que constituyen una inseparable unidad. Numerosas enfermedades admiten tratamientos epigenéticos, y no ya simplemente farmacológicos o genéticos, por ejemplo. La medicina ha comenzado, incipientemente, a saber y trabajar recíprocamente con las Ciencias humanas y sociales en toda la línea de la palabra.

- vii. *La biología sintética.* La vida se funda en síntesis: síntesis de proteínas, síntesis de biopolímeros, síntesis de imaginación, el sexo como síntesis, síntesis química y varias otras. C. Venter (2001) ha propuesto una línea de investigación de sintetización de la vida, desde arriba. Se trata de la producción de sangre artificial, la producción y crecimiento de células, tejidos y demás. Recientemente se ha comenzado a proponer la síntesis de vida, desde abajo. Las más fuertes esperanzas en la investigación descansan en este plano.
- viii. *La biología de sistemas.* De consuno con varios de los ejes anteriores, la biología de sistemas es biología de redes y síntesis al mismo tiempo, consistente ya no en la lectura del código genético, exclusivamente, sino, además y principalmente, en la posibilidad de escribir sobre él y crear nuevos códigos. Se trata de todo ese universo llamado genéricamente como las ómicas: glucómica, metabólica, transcriptómica y muchas más, todo lo cual comporta el reconocimiento de que los procesos que sostienen a la vida dependen unos

Sin embargo, estos ejes implican y remiten, a la vez, en un buen estado del arte del conocimiento, a la biología cuántica. La biología cuántica –que, digámoslo por última vez, no es más Biología, Física o Química-, es el basamento: saber de la vida significa tener un conocimiento sólido y desiderativamente algo más que básico de los componentes y articulaciones presentados en la gráfica. La biología cuántica atraviesa a cada de una de ellos y sirve como hilo conductor para el diálogo entre ejes.

4.

**Tres niveles
de un mismo problema:
complejizar el estudio
de la vida**

Para concluir, es preciso señalar que la termodinámica, en general, es la ciencia que permite unificar las Ciencias sociales y humanas y las Ciencias naturales, tanto como las Ciencias de la vida y las Ciencias de la salud, algo sobre lo cual existe ya una bibliografía suficiente. Sin embargo, en una mirada más fina, son tres las dimensiones de la termodinámica. Cada una va remitiendo a la siguiente, como, ulteriormente, a la puerta que comunica directa y necesariamente con la biología cuántica; esto es, con la elucidación de lo que es la vida y lo que hacen los sistemas vivos para vivir. De esta suerte, los problemas PI y PII quedan sólidamente interconectados. Estos tres niveles o tres tipos de termodinámica son:

- *Termodinámica clásica.* El mérito de esta ciencia (que tardó cerca de un siglo en nacer) consiste en que pone de manifiesto un concepto inexistente hasta la fecha; el concepto de energía. Literalmente, la termodinámica consiste en el estudio de los movimientos (*dinámica*) de energía (uno de cuyos casos es el calor: *thermos*), los cuales implican, de un lado, un costo de producción y, de otro, el problema del equilibrio. Lo primero apunta a la noción de trabajo necesario para hacer útil una energía libre disponible. De esta suerte, el estudio de la energía consiste en el reconocimiento de que esta, que no es creada ni se destruye jamás, no es otra cosa que la incessante transformación de un tipo de energía en otro. De este modo, resulta inmediatamente un descubrimiento sorprendente: existen numerosos tipos de energía: potencial cinética, calórica, química, informacional, entre

otras. La forma más dilecta de energía es la luz, la cual, a su vez, consiste en diferentes frecuencias. Pues bien, el universo consiste en una enorme cantidad de energía libre. La energía, dirá Einstein sobre la base Planck, es intercambiable con la materia. La materia es energía lenta, y la energía es materia rápida, supuesto el límite de la velocidad de la luz.

Ahora bien, en los sistemas cerrados o aislados existe una tendencia a una pérdida del calor. Así, el sistema cerrado o aislado en intercambio con el medioambiente tiende a igualar su temperatura con la del entorno. Sorprendentemente, se hará el descubrimiento de que los sistemas vivos son húmedos, calientes y pegajosos, y lo que hacen es conservar una energía determinada para hacerse posibles. La biosfera, dicho de manera gruesa, es un fantástico termostato. Este termostato degrada la energía del sol, como fuente más inmediata (sin desconocer que hay otras fuentes de energía más lejanas, pero no menos importantes) y genera, con ello, estructuras disipativas.

Finalmente, cabe señalar que la termodinámica clásica pone de manifiesto que la temperatura promedio del universo es de $-273\text{ }^{\circ}\text{K}$. Los sistemas vivos tal y como los conocemos constituyen fenómenos singulares en un entorno tan frío.

- Termodinámica del no-equilibrio. El gran problema que plantea la termodinámica clásica es el de la entropía. Contra ella, la termodinámica del no-equilibrio consiste exac-

tamente en el estudio sobre cómo la flecha del tiempo de la entropía no es necesaria ni inevitable. Por el contrario, la evolución, en general, consiste en un proceso de diversificación conducente a la emergencia de sistemas disipativos. Así, los sistemas vivos niegan a la física clásica, esto es, a la entropía, y consisten en remontar su flecha, que conduce al equilibrio; esto es, a la muerte (térmica); la flecha de la vida es una flecha de complejidad. La muerte o el equilibrio no es inevitable, ni necesario, ni la última palabra. Por el contrario, la vida es una incesante producción de tiempos y horizontes. Esta generación continua de horizontes es, sin embargo, no teleológica; la forma como ha sido expuesta por parte de diversos autores es como una evolución a través de paisajes rugosos adaptativos, o lo que es equivalente, como adyacentes posibles.

Significativamente, la evolución del universo no consiste en una tendencia al enfriamiento, algo que empíricamente ha sido observado por el corrimiento de las galaxias, unas de otras, en el espectro infrarrojo. La vida, que existe en filo del caso, o lo que es equivalente, alejada del equilibrio, siempre encuentra condiciones para su adaptación y supervivencia. Contra la tesis de la entropía, la vida adapta las condiciones para su conservación y perdurabilidad. Esta idea conduce inmediatamente a la vida tal-y-como-podría-ser-posible.

- Termodinámica cuántica. La tercera forma de termodinámica ya no se concentra en el concepto de energía, sino en el de información

(Binder, *et al.*, 2018). La termodinámica cuántica es útil para describir el entrelazamiento, el cual sucede espontáneamente, sin que haya un costo de trabajo. Específicamente se concentra en el estudio de la temperatura del entrelazamiento. Por tanto, resulta perfectamente idónea para estudiar los efectos cuánticos en los sistemas vivos.

La forma más destacada de entender a la termodinámica cuántica es como teoría de las interacciones, en sistemas abiertos o, lo que es equivalente, en sistemas alejados del equilibrio, o en el filo del mundo cuántico, precisamente. De manera significativa, existe una fuerte relación recíproca entre este tipo de termodinámica y la teoría de la información. El entrelazamiento, mucho más que enmarñamiento de masas o de energías, es entrelazamiento de lo que las cosas mismas son: información. En realidad, las correlaciones cuánticas son más comprensivas que los entrelazamientos. En otras palabras, esta clase de termodinámica establece el costo de energía en la transformación de un estado térmico a uno entrelazado. El resultado, desde el punto de vista biológico, es determinante para la comprensión de los sistemas vivos. Contra los otros dos tipos anteriores de termodinámica, en manera alguna cabe entender a los sistemas vivos como máquinas termodinámicas. Los sistemas vivos son procesos entrelazados. La naturaleza es una fantástica red de entrelazamientos cuánticos. Una conclusión que no cabe menoscabar de ninguna forma.

Es imposible comprender qué es salud y hacerla posible sin una idea sólida de lo que es la vida. Así, si cabe la expresión, las Ciencias de la vida emergen como propedéutica para las Ciencias de la salud. Sin embargo, es preciso decirlo de forma más explícita: la salud es una cara de una moneda cuya contra parte es la vida, y ambos son problemas perfectamente nuevos en la historia de la humanidad. Podemos pensarlas y hacerlas posible en paralelo. Esta articulación es la impronta misma de la complejidad del problema. En otras palabras, con el riesgo de incidir en banalidades, hay que decir: los temas de enfermedad no son, en absoluto, temas de salud. Pero todos los temas de salud son asunto mismo de la vida. Hemos venido trabajando en esta dirección⁶.

⁶ Me refiero explícitamente a los trabajos, con calibre diferente, presentados en la serie: *Investigaciones en Salud y Complejidad*, y en la Colección *Salud y Complejidad*, del grupo Complejidad y Salud de la Facultad de Medicina de la Universidad El Bosque. Estos trabajos pueden consultarse en: <https://repositorio.unbosque.edu.co/>.

Bibliografía

- Abbott, D., Davies, P. C. W., Pati, A. K. (eds.). (2008). *Quantum Aspects of Life*. Imperial College Press
- Allan, B. B. (Sept 2018). Social Action in Quantum Social Science. *Millenium: Journal of International Studies*, (47) 1, 87-98. <https://doi.org/10.1177/0305829818781690>
- Ball, P. (16 Jun 2011). Physics of life: The dawn of quantum biology. *Nature*, 474 (16), 272-274. doi:10.1038/474272a
- Baluska, F., Mancuso, S., Volkmann, D. (2006). *Communications in Plants. Neuronal Aspects of Plant Life*. Springer Verlag.
- Binder, F., Correa, L. A., Gogolin, C., Anders, J., Adesso, G. (eds.). (2018). *Thermodynamics in the Quantum Regime. Fundamental Aspects and New Directions*. Springer Verlag.
- Canfield, D. E. (2016). *Oxígeno. Una historia de cuatro mil millones de años*. Crítica.
- Carlson, J., Jaffe, A., and Wiles, A., (eds.). (2006). *The Millennium Prize Problems*. The Clay Institute-American Mathematical Society.
- Conway, J., Kochen, S. (2011). The Strong Free Will Theorem En H. Halvorson (ed.). *Deep Beauty: Understanding the Quantum World through Mathematical Innovation* (pp. 443-454). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976971.014>
- Dartnell, L. (2019). Orígenes. *Cómo la historia de la tierra determina la historia de la humanidad*. Debate.
- Haven, E., Khrennikov, A. (2013). *Quantum Social Science*. Cambridge University Press.
- Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Helix Books.
- Huelga, S. F., & Plenio, M. B. (2013). Vibrations, quanta and biology. *Contemporary Physics*, (54) 4, 181-207. <https://doi.org/10.1080/00405000.2013.829687>

- Kafatos, M., Nadeau, R. (1990). *The Conscious Universe. Part and Whole in Modern Physical Theory*. Springer Verlag.
- Kauffman, S. (1993). *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press.
- Kauffman, S. (2016). *Humanity in a Creative Universe*. Oxford University Press.
- Kuhn, Th. (1996). *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. F.C.E.
- Lane, N. (2005). *Power, Sex, Suicide. Mitochondria and the Meaning of Life*. Oxford University Press.
- Lineweaver, Ch. L., Davies, P. W. C., and Ruse, M. (eds.). (2013). *Complexity and the Arrow of Time*. Cambridge University Press.
- McFadden, L. (2000). *Quantum Evolution. The New Science of Life*. New York: W. Norton & Co.
- McFadden, J., & Al-Khalili, J. (12 December 2018). The origins of quantum biology. *The Royal Society Publishing*, 474 (2220), 1-13. <https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0674>
- McFadden, J., Al-Khalili, J. (2019). *Biología al límite. Cómo funciona la vida a muy pequeña escala*. RBA.
- Maldonado, C. E. & Gómez-Cruz, N. A. (2014). Synchronicity Among Biological and Computational Levels of an Organism: Quantum Biology and Complexity. *Procedia Computer Science* 36, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.076>
- Maldonado, C. E. & Gómez-Cruz, N. A. (2015). Biological Hypercomputation: A New Research Problem in Complexity Theory. *Complexity*, 20 (4), 8-18. <https://doi.org/10.1002/cplx.21535>
- Maldonado, C. E. (Enero-Junio, 2016). Hipercomputación biológica y comunicación entre los seres vivos. *Simbiótica. Revista Eletrônica*, 3 (1), 207-229. <http://periodicos.ufes.br/simbiotica/article/view/14625>

- Maldonado, C. E. (2018a). Biological Hypercomputation and Degrees of Freedom. En R. López-Ruiz (ed.) *Complexity in Biological and Physical Systems - Bifurcations, Solitons and Fractals*. (pp. 83-93). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73179>
- Maldonado, C. E. (November 2018b). A Quantum Coherence-Recoherence-Based Model of Reality. *Neuroquantology*, 16 (11), 44-48. 10.14704/nq.2018.16.11.1858.
- Maldonado, C. E. (Octubre 2019). Quantum Theory and the Social Sciences. *Momento. Revista de Física*, 59E, 34-47. <https://doi.org/10.15446/mo.n59E.81645>
- Maldonado, C. E. (2020). *Teoría de la información y complejidad. La tercera revolución científica*. Editorial Universidad El Bosque
- Mancuso, S., Viola, A. (2015). *Brilliant Green. The Surprising History and Science of Plant Intelligence*. IslandPress.
- Murphy, M. P., y O'Neill, L. A. J. (1999). *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? Cincuenta años después*. Tusquets eds.
- Piotrowski, E. W. & Stadkowski, J. (2008). Quantum Transmemetic Intelligence En D. Abbott, P. C. W. Davies & A. K. Pati (eds.) *Quantum Aspects of Life*, (pp. 291-310). <https://doi.org/10.1142/p581>
- Stadler, F. (2010). *El Círculo de Viena. Empirismo lógico, ciencia, cultura y política*. F.C.E. - Universidad Autónoma Metropolitana.
- Stapp, H. P. (2011). *Mindful Universe. Quantum Mechanics and the Participating Observer*. Springer Verlag.
- Zeilinger, A. (2010). *Dance of the Photons. From Einstein to Quantum Teleportation*. Farrar, Straus and Giroux.

Investigaciones en complejidad y salud

Facultad de Medicina

Grupo de Investigación en Complejidad y Salud Pública

n.º 9

La extraña naturaleza de la vida Biología cuántica, complejidad, vida, salud

Fue editado y publicado por la
Editorial Universidad El Bosque,
Marzo de 2021
Bogotá, Colombia

