
EL “DARWINISMO CUÁNTICO”
DE ZUREK Y SU EXTRAPOLACIÓN
A LA EVOLUCIÓN
DE LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS

EUGENIO ANDRADE

ABSTRACT. ZUREK’S “QUANTUM DARWINISM AND ITS
TRANSLATION INTO THE EVOLUTION OF ADAPTIVE SYSTEMS

In this work I justify a scheme that favors a non-reductive integration between physical and biological approaches based on the notion of information as interpretation. I start with a discussion on the cross fertilization and feedbacks between physics and biology for it helps to explain Maxwells demon metaphor as a forerunner of a notion of information applicable to the problem of biological adaptation that is best conceived today as information gathering and using systems (IGUS) in the sense of Zurek. It is shown how IGUS by means of measurements generate informative correlations between micro-states (genotype) and macro-states (phenotype), and between macro-states (phenotype) and environment. I further examine Zureks decoherence theory dubbed “quantum Darwinism” according to which the environment eliminates most of the superpositions of quantum systems leaving only a set of preferred states, among which are chosen those that are in fact realized in the classical world. In this view IGUS are equated to non-conscious agents of quantum measurement, a posture that modifies Copenhagen interpretation without falling into the difficulties of the “many worlds” interpretation. I, thus, propose that in order to tackle the problem of biological adaptation, it would be important to understand information as IGUS’ interpretative activity thought as physical and/or biological systems that actualize an organizing potential in accordance to an “internal model” of systems environment interactions, so that they interpret physical perturbations as informative signals that orient structural adjustments to be adopted and the actions that are projected to the external milieu. To end up I show how this model may serve to account for the origin of adaptive mutations in bacteria and to formally describe developing epigenetic systems. In this way the classical debate between Lamarckian and Darwinian schools must be reframed and perhaps superseded as the new scheme of interpretation is validated with more experimental evidence. To conclude I argue that semiosis is the clue to justify the deep analogy that allows to establishing bidirectional bridges between physical and biological models of adaptive evolution.

KEY WORDS. Quantum Darwinism, Neo-Lamarckism, natural selection, information, IGUS, adaptation, coherence, superposition, entanglement, sign, observer, measurement, Copenhagen interpretation, many worlds interpretation, epigenetics.

Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. / leandrdep@unal.edu.co /
<http://unal-co.academia.edu/LuisEugenioAndradePerez/Papers>

LA HIBRIDACIÓN ENTRE LA BIOLOGÍA Y LA FÍSICA

La historia de las ciencias ha mostrado una dinámica divergente tendiente a la consolidación disciplinar mediante la especialización no sólo en prácticas, sino en la elaboración de modelos conceptuales muy específicos, aunque a la vez pone en evidencia la convergencia y surgimiento de híbridos disciplinares a través del establecimiento de puentes y conexiones entre disciplinas establecidas. Híbridos que a su vez se subdividen, donde algunos de los cuales se integran a una o varias ramas disciplinares, para a su vez subdividirse y fusionarse de modo impredecible con otras ciencias. Estas divergencias y convergencias sin duda alguna han permitido vislumbrar nuevos caminos de investigación pura y aplicada, así como provocado la reinterpretación de los modelos existentes, y en el terreno filosófico han replanteado la pregunta sobre la posible unicidad del universo o mundo natural. Los dominios delimitados de cada una de las disciplinas no han impedido ni pueden evitar que nociones, ideas, formulaciones teóricas y modelos desborden el marco original para el cual fueron definidos, y se han convertido en fuentes de creación e inspiración para resolver problemas en campos disciplinares diferentes.

Las ciencias, inspiradas en la visión mecánica de la naturaleza, se han caracterizado por una búsqueda de la objetividad y el establecimiento de relaciones causales, que han favorecido la construcción de modelos que permiten estudiar cómo las perturbaciones causadas por los niveles inferiores o subsistemas constituyentes (micro-estados que describen condiciones iniciales, por ejemplo las macromoléculas constitutivas de las células), afectan el sistema o nivel en cuestión (macro-estados, por ejemplo células u organismos individuales), el cual está inscrito en un entorno que para efectos de la modelación clásica se asume constante y fijo (condiciones de frontera o cerramiento impuestas por el medio ambiente circundante). De esta manera se asume que no habría nada fuera de la frontera del sistema que pueda afectarlo, ni siquiera la observación hecha sobre él mismo, además de que no se explica el establecimiento de las condiciones iniciales. Es decir, la supuesta independencia del contexto o del medio circundante dada por condiciones estables de control experimental, se yergue como garante de objetividad.

En lo que respecta al uso de metáforas en la formulación de hipótesis, sería oportuno recordar que en el siglo XIX, la teoría de la evolución por selección natural (SN), fue descubierta por Wallace y Darwin como extrapolación al mundo natural de la ley de poblaciones de Malthus y de la "mano invisible" de Smith para ser ampliada y desarrollada con argumentos biológicos. Básicamente, de lo que se trataba era de resaltar cómo la evolución de la especie depende del contexto medioambiental en que se desempeñan, medio ambiente que se define no únicamente por los factores físicoquímicos abióticos que inciden sobre los organismos, sino como

insistió Darwin, constituido por el entramado de relaciones que se establecen entre los organismos¹.

Darwin, además de proponer que el medio ambiente juega un papel decisivo en definir el curso de las variantes poblacionales de acuerdo con un criterio adaptativo, también sostuvo que en la generación de estas variaciones a nivel individual el medio ambiente debía jugar un papel determinante. Al respecto, Darwin formuló la "hipótesis de la pangénesis", en la cual postuló que los factores de la herencia son como semillas o partículas granulosas desprendidas de todas y cada una de las partes del cuerpo que se reúnen en los tejidos reproductivos para dar lugar a la conformación de la sustancia hereditaria (Darwin, 1868). La reunión de las semillas correspondientes a todos los componentes del organismo debería dar lugar al nuevo organismo, de modo que algunas características podían ser afectadas por el uso y desuso de los órganos, los hábitos o conductas del animal y el medio ambiente, lo que haría posible pensar en la transmisión de estas características adquiridas a lo largo de la vida individual (Andrade, 2009a). Es decir, el medio ambiente debería entenderse no solamente como el filtro de variaciones preexistentes producidas al azar, sino como agente generativo de las mismas variaciones.

Es conocido que Darwin, a la vez que defendió la teoría de la evolución por SN de variantes azarosas, esto es, producidas con independencia del modo de vida y medio ambiente, también consideró que podían darse situaciones en que la naturaleza viviente evoluciona por acumulación gradual de variaciones dirigidas o generadas por el medio ambiente y moldeadas por el hábito de los organismos en su reacción al medio circundante (Andrade, 2009b). Darwin aceptaba que la ley de SN es el principal medio de modificación, pero no excluía otras alternativas, mientras que para el neodarwinismo la SN es el único medio de modificación. Darwin tuvo en cuenta la herencia de los caracteres adquiridos (HCA) por el uso y desuso de los órganos, tesis cuya originalidad se atribuye equivocadamente a Lamarck. La hipótesis provisional de la pangénesis de Darwin fue rechazada con argumentos sustentados empíricamente por Galton y posteriormente por Weissman, aunque en sí no refutaban la existencia de otro tipo de influencias del medio ambiente sobre la herencia (Bowler, 1983).

Galton y Weismann, entre otros, colocaron a la biología en el camino que con Fisher habría de conducirla a la genética de poblaciones (neodarwinismo). Con el redescubrimiento de las leyes de Mendel se hacía más viable el desarrollo de un programa de investigación basado en la naciente genética, lo cual no impidió que la hipótesis de HCA persistiera y se convirtiera en el rasgo distintivo del neolamarckismo, que en su momento no contó con un programa viable de investigación. Es así como el problema del origen de las variaciones adaptativas o la influencia del medio ambiente en el desarrollo y la herencia se mantuvo sin resolver, toda vez que la

ley de la SN se limitaba a explicar el destino de poblaciones compuestas por individuos variantes cuyo origen se podía atribuir al azar. Este último fue entendido como producción de variantes por causas que ignoramos e independientemente de las condiciones de vida y el medio ambiente. El papel hegemónico atribuido a la SN se acomoda a la idea de variaciones azarosas o independientes del contexto medioambiental, que dejó sin resolver el problema de las causas de la variación, aunque existía un consenso implícito de que la teoría evolutiva debería explicar también de dónde o cómo surgen las variaciones que son sometidas al escrutinio de la SN.

Maxwell (1999) en el siglo XIX se interesó por el papel de las metáforas en la evolución de las ciencias, y sugirió que existen analogías profundas entre campos disciplinares diferentes, cuyo descubrimiento está en la base de todo pensamiento creador. En la formulación de teorías científicas innovadoras hay una metáfora que al tomar cuerpo se convierte en una intuición muy arriesgada, que posee un potencial que sería erróneo subestimar. En este sentido, el propio nacimiento de la genética de poblaciones surgió de la adopción de los modelos matemático estadísticos de Boltzmann y Maxwell al estudio de poblaciones de organismos, concebidas como poblaciones de genes sometidas a variación azarosa y SN (Peirce, CP 5.364), para llegar a constituirse en el fundamento del neodarwinismo por parte de Ronald Fisher y Sewall Wright. Las diferencias entre los modelos poblacionales de Fisher y Wright son equiparables a las diferencias conceptuales que tuvieron Boltzmann y Maxwell respecto a si el énfasis se hace en los promedios obtenidos para poblaciones numerosas, o si se incluyen los efectos dispares debidos a la dinámica de poblaciones muy pequeñas, donde las desviaciones del promedio esperado son altas por efecto del tamaño de la muestra (deriva genética). La propuesta original de Fisher se circunscribía a una analogía formal para abordar el tratamiento estadístico de las combinatorias genéticas en poblaciones que se cruzan al azar y son sometidas a la SN. La propuesta no pretendía reducir la biología a la termodinámica estadística, sino al gen, un concepto surgido al interior de la biología aunque inspirado en el atomismo newtoniano, que se entendía como el elemento último constitutivo de los seres vivos. Fisher creía que si la analogía funcionaba, quería decir que debería existir un nivel más profundo, una ley más general que explicaba esta correspondencia entre lo físico y biológico. La investigación sobre la posible influencia medioambiental en la generación de variantes se dejó de lado ante al auge arrollador de la genética de poblaciones, que se condensa en la fórmula de evolución por SN de variantes genéticas generadas por recombinación y mutación azarosa. Es curioso que los modelos de Fisher inspirados formalmente en la mecánica estadística de Boltzmann asuman que se cumplen para sistemas de poblaciones donde el medio ambiente local

es estable y cerrado, además de que no tienen en cuenta la actividad propia de los organismos en su interacción con el medio, ni el efecto debido a la inmigración y emigración de poblaciones genéticamente diferentes. Es decir, todo el acento se pone en la producción de variantes genéticas al azar sin explorar otros factores que pudieran estar involucrados. Posteriormente, en la década de los cincuenta, la formulación del denominado "dogma central" de la biología molecular, en el sentido que toda la información contenida en el ADN fluye unidireccionalmente del núcleo celular al citoplasma mediante mensajeros de ARN, para ser traducida a proteínas, reforzaba la idea de que no hay nada en el medio ambiente, ni en las proteínas que pueda afectar el contenido de la información registrada en la secuencia de nucleótidos del ADN. Sus variaciones debían ser exclusivamente aleatorias, esto es, producidas fuera del contexto metabólico, de las etapas del desarrollo celular y del medio ambiente en que surgían.

No obstante, en las últimas décadas del siglo XX se han documentado varios fenómenos que volvieron a colocar sobre la mesa la hipótesis lamarckiana sobre el papel del medio ambiente en la inducción de las variaciones. Entre ellas están la detección repetida en condiciones controladas de la inducción de mutantes bacterianos por factores medioambientales, más precisamente por moléculas de azúcares presentes en el medio de cultivo (Cairns, et al, 1988). Además, la descripción de diversos casos de herencia epigenética, es decir, de la transmisión de caracteres de generación en generación por modificaciones de diversa índole que no afectan la secuencia de nucleótidos en el ADN, como ha sido documentado por diversos autores y recopilada por Jablonka y Lamb (1995, 1998, 2002, 2006). Asimismo, West-Eberhard (1989, 2003) ha documentado evidencia empírica que permitió redescubrir la "asimilación genética" de Waddington (1961), noción que se refiere a que las características heredables genéticamente y fijadas evolutivamente por SN, se habían originado en los ancestros como consecuencia de la plasticidad fenotípica con relación no sólo a las posibilidades dadas por la constitución genética entonces existente, sino a las condiciones del medio ambiente. En otras palabras, que rasgos fenotípicos surgidos a causa de las condiciones de vida de los organismos y del medio ambiente a consecuencia de la SN fueron enganchadas a circuitos de regulación genética en los que hay genes cooptados para la nueva función, lo cual facilita la transmisión hereditaria y fijación del rasgo adaptativo en las generaciones siguientes.

De seguro la búsqueda de analogías interdisciplinarias se debe a una predisposición favorable a la búsqueda de leyes fundamentales unificadoras por cuanto satisface criterios estéticos e intuiciones sobre la unidad de la naturaleza. En este punto, sostengo que aunque no es posible formular leyes universales aplicables a todo, ni siquiera una teoría unificada de la evolución biológica parece concebible, estoy convencido de la importancia

de crear canales interdisciplinarios que contribuyan al desarrollo de programas de investigación conducentes a un crecimiento del conocimiento tanto en extensión —aplicabilidad a un mayor número de casos, eventos, entidades— como en profundidad —mayor precisión, rigor lógico e incremento de los predicados atribuibles a dichos objetos. Tender puentes y canales de integración no reductiva entre las ciencias no se limita a poner en evidencia relaciones causales entre fenómenos estudiados por diferentes disciplinas, sino sobre todo la formulación de marcos generales de interpretación semejantes, donde conceptos surgidos en un campo disciplinar adquieren un nuevo sentido y se desarrollan al ser aplicado a otro.

Así las cosas, la sospecha de Fisher sobre la existencia de una analogía profunda en la forma de una ley más general que explicara tanto la progresiva evolución darwiniana como la segunda ley de la termodinámica, resultó afortunada por cuanto, a fines del siglo XX, los sistemas biológicos se concibieron como los sistemas termodinámicos, más apropiados que las mismas máquinas térmicas, para entender la eficiencia de la conversión de energía libre en trabajo, abriendo el camino al desarrollo de la idea de “evolución como entropía” esbozada por Prigogine y Stengers (1984), y desarrollada por Brooks y Wiley (1988), Swenson (1989), Chaisson (2001), Schneider y Kay (1994), Schneider y Sagan (2005), entre otros.

En este sentido, he argumentado que la metáfora del “demonio de Maxwell”, surgida a raíz de la interpretación mecánico estadística de la termodinámica, puede ser extrapolada a las teorías de la evolución por cuanto permite integrar dos ideas aparentemente opuestas y entre las cuales oscilan muchas de las discusiones de la biología teórica (Andrade, 2003, 2004, 2009b, 2014a). Las dos ideas son: 1. la biología requiere de una explicación física, basada en nociones termodinámicas como entropía, autorganización, desequilibrio, equilibrio, etc. 2. Los sistemas vivientes son irreducibles a explicaciones físicas, puesto que son “totalidades” integradas funcionalmente mediante el establecimiento de ajustes estructurales internos y acopladas a su medio circundante mediante acciones apropiadas, definidas a lo largo de su ontogenia individual y fijadas por SN a escala poblacional a lo largo de la historia filogenética.

La biología y la física se han aproximado suscitando el interés por la búsqueda de metáforas que abran nuevas vías de exploración conceptual, sin caer en un reduccionismo determinista, en tanto que las relaciones causales identificadas no siempre señalan hacia los niveles inferiores (físicos, moleculares), sino también al propio nivel de referencia (célula, organismo) y a los niveles superiores (medio ambiente tanto físico como el dado por las interrelaciones entre los organismos). La biología, a imitación de la física clásica, se orientó desde principios del siglo XX hacia la investigación de los componentes constitutivos: células, orgánulos, genes, macromoléculas, etc., y difícilmente se ha acomodado a un esquema

claramente reduccionista por cuanto el funcionamiento, crecimiento y diferenciación celular, el desarrollo, la evolución, la ecológica sistémica, la actividad microbiana, la regulación de la expresión genética, la conducta animal, reclaman que es necesario tener en cuenta el medio ambiente o el contexto para explicar los fenómenos de los sistemas contenidos a su interior.

En particular hoy en día vivimos una época muy interesante en que diversos autores consideran que algunas nociones formuladas al interior del campo disciplinar de la mecánica cuántica, como superposición, medición cuántica, decoherencia, entrelazamiento, inseparabilidad, no localidad, etc., pueden y deben ser desarrolladas y precisadas para ser incorporadas al dominio teórico de la biología para abordar, entre muchos otros, el problema pendiente del origen de las variaciones adaptativas que son retenidas y fijadas por la SN. A pesar de que se han descrito algunos ejemplos de superposiciones y coherencia cuánticas en sistemas vivos, se discute en qué medida estos fenómenos representan casos generales y se sugiere precaución al proponer híbridos conceptuales biocuánticos. Aun así, son tantos los ejemplos que se han descrito que muchos autores como Ho (1998), Matsuno (1989), Igamberdiev (2003, 2004, 2005), Rosen (2000), Mcfadden (2000), Davis (2004), etc., postulan que los sistemas vivos son sistemas que combinan una mezcla de estados de coherencia cuántica con estados clásicos, o bien que se mueven en un dominio intermedio. En segundo lugar, tenemos otra pléyade de autores que abogan por la adopción del formalismo de la cuántica para entender el problema específico de la adaptación a nivel genético y epigenético, aunque todavía no se hayan documentado con detalle los fenómenos donde la coherencia y superposición puedan estar involucrados. Pretendo a lo largo del trabajo mostrar el estado de esta discusión y, por otro lado, plantear que la búsqueda de híbridos conceptuales requiere del esbozo de un esquema de interpretación no reductivo, aplicable con propiedad tanto a la física como a la biología. Por su parte, el hecho de que la física pueda proporcionar nociones aplicables a la comprensión de los sistemas vivientes, no quiere decir que la biología deba renunciar a la definición de correlaciones causales al nivel de descripción propio de los organismos.

SEMIOSIS: UN ESQUEMA APROPIADO PARA UNA INTEGRACIÓN NO REDUCTIVA

Charles S. Peirce (1891) esbozó una cosmovisión fundamentada en los significativos avances de la ciencia del siglo XIX y principios del XX, especialmente en lo concerniente al aporte de Boltzmann y Maxwell en la mecánica estadística, y de Lamarck, Darwin y del paleontólogo Clarence King precursor de la idea de evolución por saltos, en lo concerniente a las teorías de la evolución biológica. Termodinámica y evolución biológica,

dos líneas de investigación nacidas y desarrolladas en campos disciplinares muy diferentes, que sin embargo apuntan en una misma dirección: la naturaleza cambiante y evolutiva no sólo de los seres vivos sino de los sistemas físicos, ambas tratables mediante los métodos inspirados por la mecánica estadística.

De acuerdo a Peirce (CP 2.228, 2.274) los procesos de cambio se pueden entender mediante la relación semiótica en la que participan tres elementos, objeto (O), signo (S), e interpretante (I), la cual se explica mejor como: "entrada (*input*) (O) \Rightarrow intermediación (S) \Rightarrow salida (*output*) (I)". En este esquema: a) La entrada son las fluctuaciones físicas (ondas sonoras, chorros de fotones, dispersión de moléculas en aerosoles, gradientes térmicos, etc.) emitidas por los objetos presentes y cambiantes del entorno, las cuales son potencialmente susceptibles de ser interpretadas como señales informativas. b) La intermediación que equivale al procesamiento del *input* externo ejecutada por parte de un "sistema de interpretación", en un contexto medioambiental específico, el cual informa o guía la elección de los *outputs* en la forma de ajustes estructurales internos a adoptar y de las respuestas o acciones a ser implementadas. c) La salida que corresponde a la ejecución de dichas acciones, es decir, la implementación efectiva de restricciones internas y las consiguientes acciones (conductas) proyectadas sobre el entorno. Ambas respuestas modifican y retroalimentan al "sistema de interpretación"; la viabilidad de los ajustes estructurales internos se garantiza por un monitoreo de funcionalidad a nivel interno a lo largo del proceso morfo-genético, y el ajuste con el entorno es regulado por la SN que asegura la propagación del cambio evolutivo a nivel poblacional. En pocas palabras, la interpretación de señales por parte de los sistemas se constituye en la base del encaje funcional adaptativo entre las partes internas del organismo, por un lado, y entre el organismo como un todo ("sistema de interpretación") y el medio ambiente (contexto de interacciones) por el otro. Este modelo, descrito por Peirce (CP 2.228, 2.274) como semiosis, suele confundir por cuanto la palabra semiótica ha sido utilizada principalmente en el ámbito de la lingüística, el arte y la comunicación, pero en este esquema se extrapola como metáfora apropiada para el mundo natural altamente interconectado donde, como reconocemos hoy en día, hay intercomunicación, creación y transferencias de información, aparición de nuevas funciones (significados) y cambio permanente. En otras palabras, partimos del reconocimiento de un universo que a escala cósmica se desarrolla y evoluciona, además de un mundo viviente, a nuestra escala, compuesto de seres que experimentan, sienten, perciben, construyen modelos internos del entorno, poseedores de diversos tipos de inteligencias, emociones e impulsos que los incitan a interactuar y comunicarse de formas muy diversas. Hay que resaltar que en este esquema la noción de información aparece asociada a la de proceso

morfo-genético como resultado de la acumulación de restricciones estructurales debidas a la interpretación de señales significativas procedentes tanto del medio ambiente como de factores internos. La información en su acepción semántica es creación de significados, lo cual se hace evidente cuando ha sido recibida y ha causado algún tipo de modificación en quien la recibe. Por esta razón, cuando se habla de transferencias de información no se trata de "bits abstractos" sino de perturbaciones físicas reales que son interpretadas como señales con contenido semántico y funcional por parte de sistemas receptores que como usuarios la utilizan para estabilizar su estructura (estados de baja entropía), ajustándola a las condiciones de un medio ambiente determinado y así lograr sobrevivir mediante la utilización de gradientes de energía disponible.

Reconozco que la noción de "interpretación" refleja un antropomorfismo que puede ser inconveniente, pero en esta perspectiva es la simple expresión del hecho de que la correlación entre *inputs* y *outputs*, no es lineal ni causal determinista, sino que se da en un contexto de interrelaciones en las que participan una diversidad de entidades y seres de la naturaleza. Además, en múltiples aproximaciones a la noción de información, la interpretación aparece como la característica más distintiva, por ejemplo para Bateson (1976) la información está referida a toda diferencia que causa una diferencia en otro que la interpreta. Ciertamente, en esta discusión el término interpretación no implica actividad racional consciente. Asimismo, la semiosis se refiere a la creación natural de sentido y significación, teniendo en cuenta que los sistemas adaptativos interactúan entre ellos y su entorno para sacar ventajas funcionales de las perturbaciones físicas que al ser interpretadas como señales informativas guían los ajustes consecuentes de su estructura interna y la elección de las acciones proyectadas hacia afuera que contribuyen a la configuración del medio circundante que actúa como factor de selección. De modo paralelo, el estudio de la evolución de sistemas abiertos lejos del equilibrio térmico, también incluye aspectos semióticos al subrayar la importancia de la autorganización, el procesamiento de información, la interacción dependiente del contexto medioambiental físico, la incertidumbre, la retroalimentación. En caso de la cuántica, nociones como superposición, coherencia, observación, medición, decoherencia, entrelazamiento, tal como discutiré más adelante, podrían interpretarse dentro de este esquema.

Dentro de este esquema, las leyes de la naturaleza pierden su carácter absoluto y comienzan a ser explicadas en términos evolutivos; en otras palabras, para poder dar cabida al azar, las leyes no pueden ser rígidas ni deterministas, sino que serían más bien equiparables a regularidades que aparecen y se arraigan y profundizan evolutivamente (Peirce, CP 6.21, 6.63, 6.64, 6.104). Ya no se habla, en consecuencia, de teorías universales sino de modelos validados únicamente para ciertas condiciones delimita-

das y especificadas, que se validan por su autoconsistencia, en función del problema a resolver, como sostiene Ronald Giere (1999).

La integración conceptual interdisciplinar ha sido percibida en ocasiones como esfuerzos estériles que al aproximarnos a una filosofía natural nos pierden en la búsqueda de las causas últimas mediante lucubraciones proclives a una metafísica, razón por la cual la filosofía natural fue dejada de lado con el auge de la ciencia fáctica y positivista orientada a la resolución de problemas teóricos y aplicados muy específicos. Además, los esfuerzos de integración conceptual no son los preferidos por los filósofos analíticos y positivistas, dado que las construcciones axiomáticas y deductivas funcionan sólo delimitando conceptualmente muy bien los problemas, situaciones y casos a los cuales se aplican, lo que aumenta, en el mejor de los casos, la profundidad del conocimiento, aunque sacrificando algo del aumento en extensión del mismo. Como señala Rosen (2000) la formalización conlleva el inconveniente de que al aplicarse a sistemas altamente especificados por las condiciones de cerramiento que se imponen, dejan de captar la dinámica natural de sistemas abiertos, en los cuales residen las propiedades más generales del mundo en que vivimos. Lo más general va con la apertura de los sistemas y la interacción con el medio circundante, lo más específico con la determinación impuesta a los niveles inferiores una vez que el aislamiento se ha impuesto. Hoy en día se ha llegado a un consenso en el que las explicaciones causales basadas en alteraciones de los niveles inferiores (causa eficiente que actúa "de abajo hacia arriba") debe ser complementada con la idea de la causalidad proveniente del efecto que los niveles superiores o medio ambientes ejercen (causalidad descendiente que opera "de arriba hacia abajo"). Además, si consideramos la dificultad de remontarnos a las explicaciones referidas a los niveles más extremos "inferiores" y "superiores", sería importante poder referir los fenómenos asociados a un nivel escalar determinado (N), al menos a los niveles contiguos y fronterizos tanto inferiores (N-1) como superiores (N+1). El marco explicativo de la semiosis acepta como "input" la causalidad física proveniente del nivel inferior, la "interpretación dada" por el propio nivel de referencia (N) en el contexto medio ambiental (N+1) en el que se recibe el efecto de la acción o "output" proveniente de (N) y desde donde se imponen restricciones a los niveles inferiores (retroalimentación y/o causalidad descendiente). En este esquema explicativo no hay necesidad de comprometerse con la definición de los niveles causales últimos, cuya delimitación hacen parte de la investigación disciplinar. La semiosis adopta una vía intermedia al aceptar un reduccionismo moderado, a la vez que recurre de un modo no tan radical al concepto de emergencia, y de esta manera contribuye a resolver problemas actuales, como el de si las explicaciones epigenéticas moleculares sin tantos detalles físicos y químicos tienen mayor o menor poder explicativo que las explicaciones físicas

estándar. Ante la pregunta de si las explicaciones basadas en causas próximas eficientes (referidas a los niveles inferiores) tienen más poder explicativo que las basadas en causas finales asociadas a la funcionalidad de los rasgos en un medio determinado (referidas a los niveles superiores), habría que responder que ambas son igualmente importantes e imprescindibles. En otras palabras, la perspectiva multiescalar es crucial para la definición de los contextos de validez explicativa tanto de las explicaciones ecológicas, epigenéticas, evolutivas, fisiológicas, genéticas y moleculares. Ningún nivel explicativo tendría la posibilidad de dar cuenta completa del fenómeno, puesto que cada uno responde a especificidades inalcanzables desde los otros. Ninguna parte del sistema puede ejercer un control sobre las otras.

Dicho de otro modo, una explicación causal de fenómenos epigenéticos adscritos al nivel N, por ejemplo, de la célula y/o del organismo, además de basarse en la búsqueda de correlaciones propias del nivel, debe también incluir tanto elementos pertenecientes a un nivel molecular (N-1), como al ecológico (N+1). Así se podría abordar la controversia entre escuelas lamarckianas y darwiniana sobre el posible efecto evolutivo transgeneracional de las variaciones epigenéticas, surgidas como ajustes estructurales heredables o modificaciones epigenéticas de los niveles (N) posibilitadas por los factores moleculares genéticos o nivel (N-1) en las condiciones de un medio ambiente determinado (N+1). En condiciones controladas, sería en principio posible estimar la sensibilidad de los fenotipos (N) a los cambios ambientales (N+1) inducidos por presencia de sustancias químicas, condiciones de nutrición, interacción con otros organismos, etc., dejando la constitución genética intacta (N-1). Igualmente la sensibilidad a perturbaciones genéticas (N-1) en un medio entorno estable (N+1) en condiciones altamente controladas (Anway, et al., 2005; Arai, et al., 2009). Con todo, queda sin resolver la preocupación por estudiar la dinámica de los sistemas vivientes (células, organismos, poblaciones, especies, comunidades) en su medioambiente natural a lo largo de las generaciones. Por consiguiente, la propuesta de un reduccionismo moderado combinado con un emergentismo blando debe ser implementada con el objetivo de comprender las agencias causales a través de la escalas de organización de la naturaleza, sabiendo que estamos lejos de definir tanto los límites inferiores últimos de los niveles escalares, e ignoramos si existe un límite superior envolvente de todos los sistemas existentes. Por esta razón creo que el esfuerzo por lograr definir líneas de dependencia causal debe enmarcarse en una perspectiva que no se limita a un nivel N con las determinaciones impuestas por (N+1) y las posibilidades definidas por (N-1), sino que considera a cada nivel de la escala (y no únicamente del organismo) como relativamente autónomo y como realidad ontológica, independiente de lo que nosotros como humanos podamos captar o

entender de ellos. Los sistemas a diferentes escalas (N) surgen dentro de rangos espacio-temporales definidos por su misma materialidad, y a consecuencia de procesos a niveles (N-1) en los que los componentes de (N-1) al mismo tiempo forman parte del entorno o contexto (N+1) en que N se manifiesta.

Con el objetivo de profundizar en esta discusión revisaré la metáfora de los “demonios de Maxwell” como “sistemas colectores y usuarios de información” o IGUS (*Information Gathering and Using Systems*) propuesta por Zurek (1989a, 1989b). Pasaré luego a examinar la propuesta del denominado “darwinismo cuántico” (Zurek, 2002, 2003, 2009), para mostrar no sólo la compatibilidad entre el enfoque termodinámico y el cuántico, sino su repercusión en la biología evolutiva cuando los sistemas adaptativos o IGUS se consideran como sistemas cuántico/clásicos que interactúan mediatizados por el medio ambiente, como agentes de “medición interna” en el sentido propuesto por Matsuno (1989, 1996, 2006), McFadden (2000), Conrad (2001) y Andrade (2000, 2014b). Por último, discutiré la repercusión del “darwinismo cuántico” de Zurek en la biología, específicamente en las discusiones sobre mutaciones adaptativas en bacterias de acuerdo con el modelo de Bordonaro y Ogryzko (2013) y, por el otro, de los modelos epigenéticos a nivel celular propuestos por Asano, et al. (2013) que pretenden utilizar el formalismo cuántico. Para concluir argumentaré que este ejercicio interdisciplinar no aspira a una teoría unificada, sino a mostrar una convergencia en torno a la noción de información como interpretación y, en consecuencia, como potencial autorganizativo (generación de estructura interna) y definición de acciones externas organizadoras del medio circundante mediante el establecimiento de relaciones funcionales internas y externas. Estas consideraciones impactan en la biología teórica por cuanto llevan a superar las visiones adaptativas de Lamarck y Darwin, ambas construidas sobre esquemas clásicos.

LOS SISTEMAS VIVIENTES COMO PROCESADORES DE INFORMACIÓN TIPO “IGUS”

La noción de información subyacente a la metáfora del “demonio de Maxwell” y su pertinencia para la biología fue discutida originalmente por Thompson (1911); Fox-Keller, (2000) y dio origen al debate sobre si la vida violaba o no la segunda ley de la termodinámica. Baste decir aquí que Zurek (1989a, 1989b) propuso que el “demonio de Maxwell” se puede concebir como IGUS que operan en condiciones de apertura al medio circundante y lejanía del equilibrio térmico. Kauffman (2000) propuso la extrapolación de este concepto para abordar el estudio de los seres vivos como agentes autónomos capaces de extraer energía. Posteriormente, Andrade (2003, 2004) mostró que esta idea abre la vía para una síntesis

ampliada de la teoría evolutiva que agranda la perspectiva neodarwinista, dándole cabida a interpretaciones neolamarckianas. Binder y Danchin (2011) aplicaron esta idea para entender la actividad enzimática en los sistemas celulares.

El modelo asume la existencia de sistemas que tienen la disposición, inclinación o motivación para procesar información, la cual utilizan para extraer la energía requerida para su mantenimiento, propagación y reproducción. Zurek (1989a, 1989b) definió una magnitud denominada entropía física (S) que decrece en una proporción equivalente a la cantidad de trabajo o energía que puede ser extraída por un IGUS después de pagar el costo de registrar información. Para poder actuar sobre un elemento específico del entorno, los sistemas vivientes deben haber generado una imagen o representación interna del entorno circundante del cual forman parte, la cual sirve para orientar las acciones efectoras sobre los objetos del medio. Este modelo es difícil de comprender debido a que estamos educados en un pensamiento lineal, ejemplificado en relaciones uno a uno, causa efecto, mientras que por el contrario el IGUS obedece a una lógica autorreferente, dado que la información captada del entorno incluye información de sí mismo, puesto que el IGUS está inmerso en dicho entorno, a la vez que mediante su actividad contribuye a su configuración y modificación. El medio ambiente actúa como un canal de la información emitida por una diversidad de objetos, haciéndola disponible a otros IGUS (sistemas vivientes) los cuales capturan fotones, sustancias químicas, ondas sonoras, gradientes de temperatura, etc., que al incidir sobre los órganos receptores o sensoriales generan una imagen o representación interna del mundo externo, la cual induce la adopción de ajustes estructurales internos en el intento de preservar su encajamiento o ajuste funcional con el medio. En consecuencia, la información del entorno se capta permanentemente y los registros informativos se van poniendo al día con la nueva información captada. Los IGUS actualizan información por medio de la autoimposición de restricciones que ajustan el macro-estado más probable con elementos significativos del entorno.

En consecuencia, los sistemas vivos (IGUS²) poseen una estructura organizada reflejada en dos niveles, genotipo (micro-estados) y el fenotipo (macro-estados) (Andrade, 2003). El nivel fenotípico está en íntima interacción con el medio circundante mediante el acomodo funcional con factores del entorno que el IGUS distingue como relevantes. Por otra parte, el ADN almacena información acumulada a lo largo de la evolución en la forma de un registro codificado que posibilita y facilita la propagación y reproducción de los fenotipos exitosos. El almacenamiento de la información registrada en modo digital ocurre mediante la generación de restricciones sobre el micro-estado a causa de los ajustes estructurales del macro-estado en un medio ambiente dado. Los micro-estados así genera-

dos estabilizan a su vez los macro-estados realizados y hacen posible acceder o alcanzar otros nuevos macro-estados en un futuro inmediato. La acumulación de información a lo largo de la evolución obedece a la ley del incremento de entropía, puesto que el uso de la información permite que los IGUS degraden los gradientes de energía detectados (contribuyendo al aumento de la entropía global) con el fin de aprovecharlos para mantener su organización dentro de un umbral de estabilidad caracterizado por estados de baja entropía mediante las restricciones impuestas por los macro-estados (Brooks, et al., 1988). La SN favorece a los IGUS más eficientes en la extracción de energía del entorno, los cuales a su vez son los que registran fielmente la información en dos modos, el genético (digital, información codificada a nivel de los micro-estados) y el fenotípico (estructural, información estructurada a nivel macroscópico), preservando simultáneamente ciertos grados de plasticidad estructural (macro-estados) y de redundancia digital (micro-estados). (Figura 1).

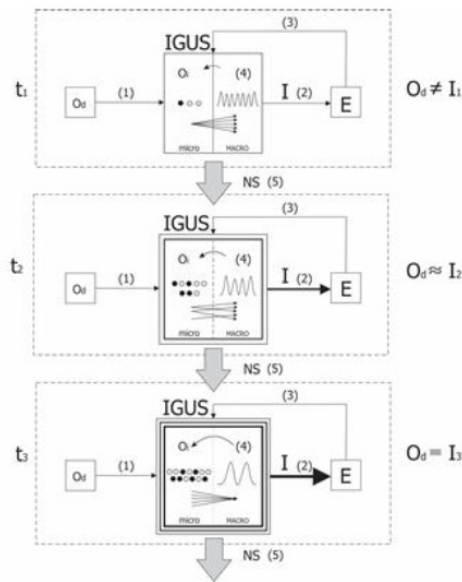


FIGURA 1. Iteración semiótica que muestra la transmisión de información del “Objeto dinámico externo” (*input*) al “Interpretante” (*output*) mediatizada por el IGUS. O_e : objeto externo dinámico, emisor de perturbaciones físicas o “input”. Micro: micro-estados, registro digital, representación interna de objetos externos. MACRO: macro-estados, registro estructural (análogo). IGUS: sistema de interpretación de las perturbaciones físicas como señales informativas. E: medio ambiente o entorno. Flechas: 1. De O_e al IGUS: efecto causal del objeto externo sobre los micro-estados. 2. Del IGUS a E: acción efectora o “output”. 3. De E al IGUS: restricciones del entorno hacia el IGUS, o retroalimentación. 4. De MACRO a micro: restricciones de los macro-estados sobre los micro-estados, causalidad descendente. 5. Flecha hacia abajo: selección natural. En una etapa temprana de la iteración t_1 , hay baja correlación entre micro/macro-estados y entre macro-estados/entorno y por tanto a “un” registro digital le corresponden “muchos” en modo estructural. El O_e (*input*) y la acción resultante (*output*) no se corresponden. En una etapa avanzada de la iteración t_2 , aumenta la correlación entre micro-estados/macro-estados y entre macro-estados/entorno y por tanto a algunos registros digitales le corresponden “uno a uno”, algunos registros estructurales. Hay correlación entre el O_e (*input*) y la acción resultante (*output*). En una etapa más avanzada de la iteración t_3 , hay alta correlación entre micro-estados/macro-estados y entre macro-estados/entorno, y por tanto a “muchos” registros digitales le corresponde “uno” estructural (análogo). Así, se alcanzan un alto grado de correspondencia entre el O_e y la acción resultante, puesto que la información ha sido transferida aunque el potencial interpretativo del objeto externo no se agota. La sucesiva iteración disminuye la incertidumbre sobre el estado macroscópico del IGUS o la plasticidad de los macro-estados, a la vez que aumenta el tamaño del registro digital de información, lo cual incrementa la correlación entre micro y macro-estados por un lado y entre macro-estados y el medio ambiente por el otro (Andrade 2014a).

Ganar, crear o actualizar información significa generar correlaciones entre posibles macro-estados y el entorno, y entre micro-estados y macro-estados a consecuencia de procesos de interacción entre el IGUS y su medio circundante. De acuerdo con Pattee (1995) la medición es una interacción entre un sistema observador y uno observado que genera correlaciones entre ellos. Para ello deben darse al menos dos pasos: (1) Reconocimiento estructural conducente a un acoplamiento, mediado por un motivo utilizado por el observador como estándar de clasificación y comparación de una diversidad de factores externos. (2) Ajuste estructural interno o reducción del número de conformaciones accesibles para el estado acoplado con respecto al no acoplado. La información generada durante la interacción (medición) da lugar a correlaciones entre los estados del sistema medido del entorno y el sistema que mide, en este caso un observador inmerso en el entorno dentro del cual se desempeña y que con sus acciones contribuye a configurar.

En los IGUS seleccionados se registra a nivel micro un aumento de redundancia y a nivel macro una “compresión de información”, puesto que un número cada vez mayor de micro-estados a un nivel [N-1] (por

ejemplo, genético) puede ser descrito por un único macro-estado al nivel [N] (por ejemplo, a nivel celular y/o del organismo) en el contexto de un supra-nivel [N+1] (por ejemplo medio ambiente). De la discusión anterior se desprende que los IGUS actúan como procesadores de información, sistemas autocatalíticos en el sentido de Ulanowicz (2009b) los cuales mantienen la estabilidad y organización mediante el establecimiento de encajes funcionales de tipo estructural, entre los *input* procedentes del medio externo y las acciones resultantes proyectadas hacia afuera o *output*.

Para que un sistema (N) se comporte como IGUS debe poseer una organización a partir de componentes o subsistemas constitutivos (N-1) a la vez que hacer parte de un sistema de orden superior (N+1). Las características más notables serían: 1. Poseer una estructura o macro-estado demarcado del entorno por fronteras definidas aunque selectivamente permeables al medio (membranas, cápsula, estomas, piel, poros, sensores, receptores, órganos sensoriales, etc). 2. Poseer microcomponentes identificables individualmente dentro de la frontera delimitada. Estos microcomponentes, en cuanto pueden ser influidos causalmente por perturbaciones generadas por objetos presentes en el medio ambiente externo, sirven de base material para la construcción de representaciones internas del medio externo. 3. Formar parte de una población, la cual está inmersa en un contexto de relaciones con otros IGUS semejantes pero no idénticos, y con otros muy diferentes. 4. Capacidad de elegir entre, al menos, dos configuraciones macroscópicas alternativas en condiciones locales específicas de entorno.

De acuerdo a Zurek (1989a, 1989b), la magnitud H (entropía de Shannon) mide la incertidumbre remanente en el IGUS acerca de su entorno y acerca de sí mismo, la cual decrece por las interacciones o "mediciones" a lo largo del tiempo a medida que se generan restricciones que actúan sobre el IGUS mismo (ver figura 2). Los sistemas vivientes primitivos pudieron haber surgido por interacción de sistemas moleculares donde las moléculas estaban menos constreñidas estructuralmente y por tanto podían ser cooptadas con mayor probabilidad para tareas diversas aunque con baja especificidad (Kauffman 1993). A lo largo de la evolución estas moléculas plásticas se hicieron más estables a la vez que las tareas que ejecutaban se volvieron más específicas, hecho que impulsó la emergencia de nuevos niveles de organización que ejecutan nuevos tipos de tareas y funciones que incrementan todavía más las tasas de disipación global de entropía al entorno.

Por otra parte, el registro informativo actualizado puede ser concebido como una sucesión de macro-estados cada vez más específicos (ver figura 2 y 3). Pero como observadores externos que ignoramos la historia de las interacciones de los organismos con el ambiente o, lo que es lo mismo, de cada una de las elecciones o ajustes realizados por ellos a lo largo de su

evolución, no podemos evitar concebir retrospectivamente el registro de estos procesos como resultado de contingencias históricas o como aleatorio y por tanto describible como complejidad algorítmica de Kolmogorov y Chaitin (K). Las mediciones o interacciones continúan hasta el momento en que pragmáticamente se toma una decisión de compromiso entre la cantidad de elementos del entorno que el IGUS debe reconocer o distinguir y el grado de precisión y exactitud con que debe hacerlo para poder desempeñarse de un modo adecuado.

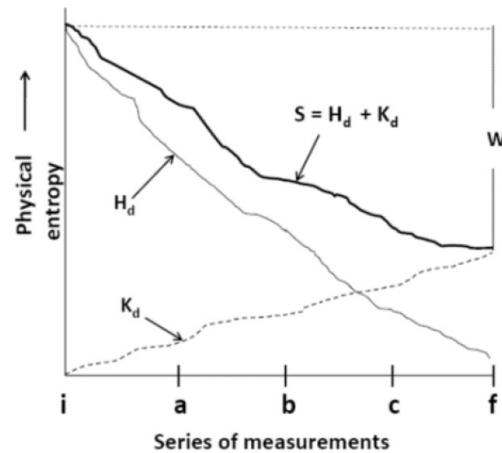


FIGURA 2. Entropía física de Zurek ($S = H + K$) (Zurek 1989a, 1989b). Entropía física contra mediciones ejecutadas por el IGUS en un entorno abierto en desequilibrio termodinámico. La entropía de Shannon H (información faltante) corresponde a la incertidumbre remanente en el IGUS acerca de su entorno y acerca de sí mismo, la cual decrece mediante interacciones o "mediciones". La complejidad algorítmica de Kolmogorov-Chaitin K (aleatoriedad conocida) describe el registro informativo como una sucesión aleatoria de macro-estados. La curva resaltada en negro representa la variación de S. La curva clara representa las variaciones de H con el número de mediciones. La curva punteada representa la variación de K con el número de mediciones (digno de notar) que cada paso de medición constituye una elección entre estados estructurales accesibles, elección que se percibe como aleatoria por un observador externo, pero desde la perspectiva del propio IGUS, ésta se decide en función de la información procesada. W corresponde a la cantidad de trabajo que puede ser extraído por el IGUS. De izquierda a derecha i, a, b, c y f, corresponden al desarrollo o evolución por pasos. i) Estado inicial. a) Estado temprano, apertura, crecimiento y expansión, prevalencia de la incertidumbre o H. b) Estado intermedio, estabilización, cerramiento parcial, máxima conversión de H a K. c) Estado de decadencia, cerramiento, dominancia de K, la aleatoriedad conocida, la información codificada, f) Estado final.

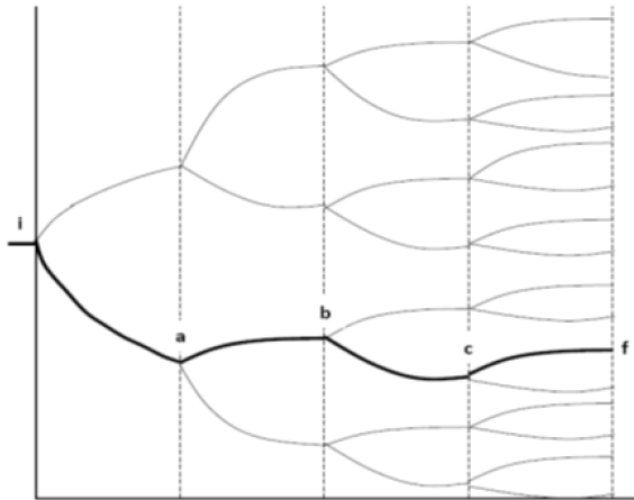


FIGURA 3. La relación entre H (entropía de Shannon o “información faltante”) y K (entropía algorítmica de Kolmogorov y Chaitin o “aleatoriedad conocida”) se puede ilustrar como un diagrama de opciones binarias en el cual a partir de las muchas trayectorias posibles dadas en el punto inicial “I” solamente una se actualiza en el estado final “F”. Los eventos de medición, interacción o ajuste representados por los pasos a, b y c conforman una trayectoria constituida por las elecciones hechas por el IGUS. De I a F la información H de Shannon disminuye con la reducción de incertidumbre sobre el estado final, mientras que K (entropía algorítmica de Chaitin) incrementa con el número de pasos necesarios para alcanzar este estado final. En el caso de un proceso evolutivo inferido retrospectivamente, K aparece como la magnitud que describe una trayectoria única que ha tenido lugar en el espacio de trayectorias posibles. La disminución de H con pocas mediciones lejos del equilibrio es suficiente para informar las elecciones del agente (Andrade, 2014a).

De las argumentaciones precedentes se desprende que el comportamiento del IGUS se ciñe al principio de maximización de la energía extraída o aprovechada mediante la “compresión máxima” de los registros de información a nivel N y la máxima redundancia permisible a nivel $(N-1)$. La ganancia o captura de información disponible en el entorno genera correlaciones entre los macro-estados del IGUS y los factores del entorno relevantes para el propio IGUS. A su vez, la optimización en la codificación lleva a que los estados macroscópicos del propio IGUS estén asociados a un número mayor de micro-estados. En otras palabras, al ser objeto de SN , los IGUS que sobreviven son los que maximizan el trabajo que ejecutan en su

beneficio, a la vez que minimizan, por efecto de las restricciones, la entropía conformacional de los estados micro y al mismo tiempo estabilizan las configuraciones macro. Es de singular importancia no olvidar que las acciones del propio IGUS son inferencias creativas que mediante la elección de ajustes apuntan a la resolución de los problemas de supervivencia. La SN actúa sobre poblaciones de IGUS que se enfrentan a la explotación de un gradiente energético, mientras que las elecciones individuales son equiparables a inferencias tendientes a escoger ajustes internos y de acciones o respuestas apropiadas. La SN favorece a los IGUS que hacen las inferencias acertadas en las condiciones locales de existencia. En otras palabras, la actualización de información está sujeta al escrutinio riguroso y permanente de la SN que favorece en consecuencia a los individuos que hacen las elecciones funcionalmente viables sobre el medio ambiente.

El fin pragmático inmediato de la información es asegurar la supervivencia y la reproducción de los sistemas vivientes. De acuerdo con Salthe, el fin último de la información sería avanzar en el proceso que conduce hacia un universo en equilibrio mediante el uso y degradación de los gradientes energéticos a nivel local (Salthe, 2004, 2010; Schneider & Sagan, 2005). No obstante hay que tener en cuenta que paradójicamente la acción de los IGUS al favorecer la emergencia de sistemas más complejos contribuye a alejar la naturaleza todavía más del equilibrio, potenciando la evolución por rumbos impredecibles. Esto significa que el aumento de entropía conducente a equilibrios locales lleva no obstante a alejamientos todavía mayores del equilibrio global en un universo no ergódico, abierto en expansión que incrementa a futuro las posibilidades de la evolución (Kauffman, 2000; Ulanowicz, 2009a,b). Como resultado se genera un mundo estrechamente conectado de relaciones donde cada parte está en función de otras en la forma de un sistema autónomo con una alta correspondencia funcional entre micro-estados, macro-estados y entorno. Los procesos de disipación de entropía se intensifican con la aparición de sistemas de interpretación tipo IGUS, los cuales mediante la creación de significados contribuyen a la expansión del espacio de las interacciones y tareas posibles que posibilitan la aparición y emergencia de formas cada vez más diversas y complejas que actúan como nuevos sistemas de interpretación.

LA RELACIÓN ENTRE LOS DOMINIOS CUÁNTICO Y CLÁSICO

A) LA INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE Y LA DE LOS "MUCHOS MUNDOS" Schrödinger (1944) sostuvo que la vida era explicable por leyes físicas, pero se preguntaba si las leyes clásicas eran suficientes o si, por el contrario, sería necesario asumir la vida como un fenómeno cuántico ³. Consideraba la

vida como un proceso en desequilibrio térmico caracterizado por el metabolismo y la reproducción. El primero, que garantiza el mantenimiento del ser vivo mediante procesos bioquímicos que suministran energía libre extraída del ambiente, y el segundo, que perpetúa la vida de generación en generación dado que una estructura particular no podría persistir debido a las perturbaciones permanentes procedentes del ambiente. Postuló, en consecuencia, que la estabilidad de las formas de vida se debía a las interacciones cuánticas entre los electrones, en resonancia con los enlaces entre monómeros que conforman las macromoléculas que registran la información genética en modo digital y en las que ejercen funciones catalíticas.

El problema de cómo relacionar el mundo cuántico con el clásico surge al considerar que el espacio de Hilbert ⁴ que describe a los primeros es inmensamente grande, puesto que, de acuerdo con el principio de superposición, cualquier combinación lineal arbitraria de estados cuánticos es posible. Ello implicaría que los estados clásicos con los que estamos familiarizados constituyen apenas una ínfima fracción de los posibles. Las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica han aparecido justamente para establecer las correspondencias entre los estados cuánticos y la realidad clásica.

De acuerdo con la Interpretación de Copenhague (IC), el estado de un sistema cuántico se representa como un vector en el espacio de Hilbert, el cual evoluciona de modo determinista, continuo y gradual, de acuerdo con la función de onda de Schrödinger ⁵, hecho que contrasta con la existencia de un mundo macroscópico con estados discontinuos y discretos describibles por valores propios característicos. Bohr postuló la existencia de una línea divisoria entre el mundo clásico y el cuántico, o entre un mundo microscópico donde predomina la superposición, la indeterminación y el potencial informativo y un mundo macroscópico newtoniano donde predomina la determinación, la información actualizada en formas discretas, aunque el trazado de esta frontera sea evasivo y conceptualmente podamos correrla arbitrariamente. En esta distinción, los aparatos de medición, así como los observadores, pertenecen al dominio clásico, el cual obedece leyes que pueden ser confirmadas, y establecen el marco necesario para definir el dominio cuántico. Para Bohr, los dominios cuántico y clásico se conectan por medio de la medición, concebida como una intervención extrafísica que interrumpe azarosamente la evolución de la función de onda. En este proceso, el dominio clásico macroscópico filtra de los muchos resultados posibles un resultado específico, provocando el colapso del micromundo cuántico. En este sentido, Bohr sostuvo que era necesario tener en cuenta el contexto en que tienen lugar las mediciones cuánticas, es decir, las contribuciones del aparato de medida, las propiedades del sistema cuántico y la medición. La inseparabilidad profunda

entre los objetos cuánticos y los aparatos de medida hace que la realidad sea dependiente del contexto en que tiene lugar la observación y la medición. Esta interpretación de la mecánica cuántica deja sin resolver el problema de la emergencia del mundo clásico, en ausencia de observadores conscientes, a partir de un mundo cuántico fundamental propio de las partículas elementales. En otras palabras, para la IC los objetos no tienen una realidad independiente de la observación, es decir, los electrones y fotones existen pero a consecuencia de la medición, la cual obedece a razones extrafísicas. De acuerdo con este esquema, la mecánica cuántica no describe una realidad, sino los resultados de mediciones ejecutadas con aparatos macroscópicos, dejando sin resolver la correlación entre el vector de estado que describe la función de onda y la realidad "objetiva" producida por la medición, o sea, la relación entre *inputs* cuánticos microscópicos y *outputs* clásicos macroscópicos.

La inexistencia de una realidad objetiva independiente de la observación consciente constituye un problema que invita a repensar la noción de medición cuántica. Con el fin de avanzar en la comprensión de lo que denominamos realidad, hay que rechazar el carácter antropocéntrico de la medición cuántica, para preguntarnos qué tipo de entidades y sistemas pueden actuar como agentes de medición. En este sentido, hemos visto que todo sistema que opera como IGUS podría ser equiparable a un agente físico de medición y, en consecuencia, una perspectiva informacional (semiótica) donde la realidad contextualmente dependiente de sistemas de interpretación resulta ser la más adecuada.

En contravía a la IC, la interpretación de los muchos mundos (MM) de Everett (1957) se pronunció a favor de la inexistencia de una frontera entre lo clásico y lo cuántico, al defender que toda la realidad es cuántica. El universo podría describirse por un vector de estado unitario ⁶ que representa una superposición inmensa, que al irse subdividiendo va acomodando todas las alternativas consistentes con las condiciones iniciales. En esta interpretación, el observador consciente de Bohr no es necesario puesto que en un universo cuántico los estados de superposición y coherencia serían permanentes. Más aún, el objeto medido, los dispositivos de medición y los observadores estarían también en superposición. En consecuencia, cada vez que se da una interacción entre dos sistemas cuánticos la función de onda se divide, lo que da lugar a interferencias que provocan bifurcaciones permanentes. De este modo, tendrían lugar infinitos eventos interferentes que generan una diversidad creciente de resultados, cada uno de los cuales se ubica en alguna de las ramas que brotan con la evolución de la función de onda del universo. Al no haber reglas de selección, todas las ramas tienen probabilidades iguales de existir, ya que ninguna generaría un resultado definido "mejor" que las otras y, por ello estaríamos viviendo en uno de los numerosos universos igualmente re-

ales. De acuerdo con esta interpretación, no hay observadores clásicos, ni medición propiamente tal, ni colapsos bruscos de la función de onda, sino interferencias entre sistemas cuánticos que se subdividen en innumerables mundos cuánticos y que, por tanto, deja sin explicar el mundo clásico al ignorarlo. El número de mundos estimados de acuerdo con la teoría de cuerdas sería del orden de 10^{500} , un número exorbitante que hace que esta hipótesis sea inconcebible, toda vez que la existencia de siquiera uno solo de los universos paralelos es indemostrable (Kauffman 2008).

B) LA TEORÍA DE LA DECOHERENCIA O EL DARWINISMO CUÁNTICO

Como un desarrollo de la IC que incorpora elementos de la interpretación de los MM, tendríamos el “darwinismo cuántico” de Zurek (DC), o teoría sobre la decoherencia por “selección inducida por el medio ambiente”, la cual reformula el problema de la observación y medición cuántica (Igamberdiev, 2008).

En esta interpretación, la coherencia o superposición cuántica es un estado puro que contiene información sobre los estados de fase de todas las superposiciones existentes, la cual se afecta por un medio ambiente poblado principalmente de fotones y partículas que se mueven en todas direcciones, borrando información de la gran mayoría de los estados en superposición y dejando sin alterar o, mejor, seleccionando un conjunto de estados punteros o preferidos. Estos estados punteros —representados como subespacios de Hilbert mutuamente ortogonales— son estables y constituyen el registro del resultado de las mediciones ejecutadas por el ambiente y, por consiguiente, serían los responsables de las propiedades clásicas. Es decir, las propiedades clásicas del mundo surgen espontáneamente por un proceso de pérdida de la superposición —decoherencia cuántica— a causa de la acción del medio ambiente que monitorea permanentemente a los sistemas cuánticos.

El medio ambiente, en cuanto sumidero de la información cuántica, permite prescindir de la medición consciente de Bohr. Tenemos entonces que, a partir de un conjunto de estados virtuales pertenecientes a un sistema cuántico individual, solamente sobreviven los estados preferidos o adaptados al entorno. En otras palabras, el entorno monitorea permanentemente ciertos observables del sistema cuántico y en lugar de provocar el colapso manifiesto en un estado clásico discreto con valores propios, selecciona un conjunto de estados posibles, los realmente accesibles para su actualización, estados que retienen correlaciones entre el sistema y el entorno. Si utilizamos una imagen geométrica sugerida por Gould (2002) para ilustrar las diferencias entre la teorías gradualista darwiniana y la saltacionista, propongo que todos los estados en superposición se podrían representar por los puntos en la superficie de una esfera y, por tanto, infinitas variaciones mínimas en todas las direcciones estarían al alcance

para una población, pero en las condiciones de un medio ambiente determinado la inmensa mayoría de las variaciones potencialmente accesibles se pierden y quedamos restringidos a un poliedro, cuyas múltiples caras corresponden a los estados susceptibles de ser actualizadas a nivel individual. La evolución por saltos sería algo así como lanzar el poliedro para definir al azar la cara en que cae, la cual define el promedio alrededor del cual fluctúan las variaciones realmente accesibles en la población, y en el caso del DC a cada cara le correspondería un estado perteneciente a la base preferencial impuesta por el medio ambiente en la medición al sistema individual. Por consiguiente, la evolución tendría lugar por el cambio en el ángulo de giro de los ejes ortogonales en el espacio de Hilbert por el efecto impredecible de la interacción del sistema cuántico con el medio ambiente.

Los aparatos de medición serían, entonces, dispositivos muy específicos contruidos por los humanos que, como parte del medio ambiente, provocan un colapso repentino de la función de onda en condiciones controladas de experimentación, pero a partir de esta situación muy específica no podemos inferir como conclusión general que en el mundo natural en ausencia de observadores conscientes los procesos transcurran de la misma manera. Si la interacción con el medio ambiente conduce a un cambio macroscópico detectable en algún lugar, significa que la decoherencia ha tenido lugar y que entonces el vector de estado original se ha reducido a uno de los valores propios pertinentes al proceso de interacción, es decir, que la información acerca del estado del sistema ha dejado su huella en el medio ambiente entrelazándose con él. Por tanto, para los estados propios del observable pertinente se pueden inferir correlaciones entre las propiedades cuánticas y las propiedades macroscópicas observables. De esta manera, la ecuación de Schrödinger describiría no solamente las propiedades intrínsecas del sistema cuántico, sino también la evolución de los posibles efectos macroscópicos en el medio ambiente, incluyendo los aparatos de medida (Roederer, 2012).

Por otra parte, y en conexión con la termodinámica, los estados preferidos corresponderían a los estados de mínima entropía, mientras que la habilidad del entorno para eliminar superposiciones del sistema cuántico depende de su capacidad para incrementar la entropía (Zurek, 2003; Zwolak, Quan, & Zurek, 2009). De modo semejante, la evolución darwiniana premia con el éxito reproductivo a los sistemas que poseen la habilidad de autoconstreñirse en estados de baja entropía, incrementando así la entropía disipada en el entorno. Es decir, que los sistemas cuánticos evolucionan mediante interacción permanente con su entorno para ubicarse y acomodarse en estados estables de baja entropía a expensas del aumento de entropía en el entorno. En el caso de los seres vivos, las

restricciones internas mantienen estados de baja entropía que constituyen el fundamento de las adaptaciones.

Propongo, en consecuencia, que el entorno es todo lo que rodea a un sistema, el cual contiene entidades pertenecientes a distintos niveles de organización y por ello pertenecientes a categorías conceptuales diferentes, desde partículas dispersas en movimiento presumiblemente azaroso, bosones, fotones, electrones, quarks, protones, átomos, moléculas, virus, bacterias, células, organismos, elefantes, comunidades bióticas, hongos, pinos, ballenas, selvas tropicales, humanos y sus productos tecnológicos como aparatos de medida, televisiones, automóviles, edificios, factorías, ciudades... etc. Las entidades de menor escala predominan en el ambiente por factores de varios órdenes de magnitud, mientras que las de mayor escala son muchísimo menos abundantes. Es decir, los niveles inferiores escalares son los que más contribuyen a la conformación del entorno y, por esta razón, pensar el entorno como un sistema envolvente de orden superior que impone restricciones a los componentes de los niveles inferiores sería equivalente a decir que el ambiente elimina estados posibles y retiene o fija los preferidos. De modo semejante, explicar la emergencia del mundo organizado a partir de la descripción de los componentes fundamentales nos remite también a las partículas subatómicas que a medida que interactúan entre ellas se entrelazan y contribuyen a la conformación de su medio ambiente externo. Dicho de otro modo, las partículas subatómicas aparecen tanto en los extremos inferiores como superiores de las escalas jerárquicas de organización o, mejor, en los ambientes internos entrelazados con los externos. Escarbar en los niveles últimos constitutivos de la materia nos lleva inevitablemente a enfrentarnos con las partículas, cuya inmensa mayoría estaría entrelazada con otras en el medio ambiente. Por esta razón resulta más conveniente definir el medio ambiente con relación al conjunto de los factores que son significativos para cada uno de los sistemas contenidos en ellos, porque corresponden al espacio de donde provienen los estímulos perceptibles, y además donde se proyecta la acción de estos mismos sistemas. Es decir, no hay un ambiente universal envolvente de todo lo existente, sino subambientes que se delimitan en función de los factores relevantes para todos y cada uno de los sistemas y entidades. En otras palabras, las entidades y sistemas existentes son impenetrables en su constitución última pero pueden ser estudiados si investigamos tanto los factores ambientales que inciden y provocan en ellos cambios de estado, como los efectos ambientales que ellos generan. De esta manera la física reencuentra la semiótica. Por ejemplo, para que un sistema A establezca una interacción con uno B, se requiere que A detecte en el entorno E perturbaciones físicas provenientes de B, y que además las interprete como señal informativa, es decir, que provoque un cambio de estado en A en función de B en el contexto dado

por E. Lo mismo vale en sentido contrario. Esto quiere decir que no hay interacciones directas sino que siempre están mediatizadas por el entorno o medio ambiente, el cual se convierte en un espacio de relaciones altamente heterogéneo y asimétrico. Esto es, no podemos conocer los IGUS directamente, sino a través del ambiente significativo en que ellos actúan.

En esta perspectiva, el agente colector y usuario de información (IGUS) actuaría como un demonio de Maxwell suspendido en un estado intermedio entre lo cuántico (potencial e indeterminado) y lo clásico (actual y determinado), el cual interactúa indirectamente con otras entidades en un entorno del cual hace parte constitutiva y que al actuar modifica, a la vez que se modifica a sí mismo. No hay, por tanto, lugar a la prevalencia del observador consciente, de modo que los colapsos bruscos (grandes saltos) de la función de onda serían muy poco frecuentes, mientras que las transiciones discontinuas menos intensas (pequeños saltos) entre estados, serían mucho más frecuentes. En esta línea argumentativa, un observador es todo sistema (cuántico-clásico) inmerso en un contexto medio ambiental que dada su organización interna es capaz de detectar perturbaciones físicas cuánticas (fotones, electrones, subpartículas, etc.) y clásicas (campos electromagnéticos, sustancias químicas, etc.) del entorno externo e interno, emitidas por otros sistemas, e interpretarlas como señales informativas que los guían en la subsiguiente adopción de restricciones internas y las acciones implementadas hacia el medio externo. En consecuencia, cada IGUS corresponde a una subregión del medio ambiente significativa para cada uno de ellos.

De acuerdo a McFadden⁷ y siguiendo a Conrad (2001), las células actúan como agentes que miden la localización de los protones en las enzimas, utilizando como aparato de medida los correspondientes sustratos metabólicos. Por ejemplo, cuando un protón P se mantiene en superposición oscilando entre el átomo de nitrógeno adyacente y el oxígeno de la glutamina, fuera del alcance de los aminoácidos que hacen parte del sitio catalítico de la β -galactosidasa, no tiene significado ni para la proteína ni para la célula que la envuelve. Sin embargo, en presencia de lactosa, la localización de P se restringe al oxígeno del aminoácido glutamina al interior del sitio catalítico de la enzima, movilizandole electrones y protones al sustrato enzimático (lactosa) y provocando así la desestabilización de los enlaces químicos. Si por el contrario, P se localiza en el nitrógeno adyacente, no afecta a la lactosa y la enzima no funciona. Tenemos pues que la enzima mide la posición del protón, utilizando como aparato de medida la lactosa. Una vez que la lactosa se degrada en glucosa y galactosa, éstas se degradan en las correspondientes vías metabólicas y liberan electrones que alimentan la cadena respiratoria donde se produce ATP. El ATP se utiliza de múltiples maneras para el suministro de energía que sustenta la división celular y la biosíntesis de proteínas, procesos que

provocan cambios masivos en la posición y energía de miles de millones de partículas dentro y fuera de la célula, detectables como fenómenos clásicos. Sólo entonces podemos afirmar que P, en efecto, se ligó al átomo de oxígeno de la glutamina. Si estos fenómenos no hubieran tenido lugar, inferiríamos que P permanece ligado al átomo de N. Es decir, que el proceso ocurre porque la célula ejecuta mediciones cuánticas internas sobre sus propios protones. Hay que mencionar que la medición cuántica interna no está restringida a la posición de las partículas, sino que puede aplicarse a valores de energía, momento, *spin*, o cualquier otra propiedad cuántica. Los entrelazamientos entre partículas al interior de las células y su medio interno, hace que las células sean altamente sensibles a toda clase de eventos cuánticos que tengan lugar a su interior, y por ello, de acuerdo con MacFadden (2000), podemos afirmar que al interior de la célula no existe una frontera ni definida ni fija entre el dominio clásico y el cuántico. Se desprende de este ejemplo que para células en condiciones de inanición por ayuno, la mayoría de las partículas estarían en superposición, y que en presencia de fuentes de energía el dispositivo de medición cuántica equipado de moléculas (sustrato) ejecuta mediciones sobre las partículas forzándolas a tomar los valores reales propios del mundo clásico. Podemos ver en este ejemplo que la frontera cuántico/clásica se desplaza a los niveles más inferiores cuando los estados de superposición están protegidos de las interacciones ambientales. En conclusión, tendríamos que las células ejecutan mediciones cuánticas que miden sus estados internos, e influyen de esta manera su dinámica, escapando así del determinismo. La agencia de la célula se debe a que el medio ambiente la dota con un aparato de medición (en este caso el sustrato metabólico), el cual determina las propiedades que la célula puede medir. El comportamiento celular afecta la dinámica cuántica a su interior y la elección de acciones que inciden clásicamente. De la discusión precedente se infiere que la frontera entre lo clásico y lo cuántico depende del grado de aislamiento y de la manera en que el sistema cuántico sea abordado para su medición. Por tanto, resulta comprensible que dada la dificultad de aislar y medir los sistemas macroscópicos sin perturbarlos los consideremos como clásicos. No existiría, en consecuencia, un dominio clásico autocontenido, sino como idealización aplicable a los sistemas macroscópicos que han cruzado la frontera que los mantenía aislados. Pongamos un ejemplo: así como en este caso se ha considerado al ADN como un sistema en superposición y la célula como su entorno que ejecuta mediciones, también podríamos correr la frontera cuántico/clásico, de manera que la célula sea pensada como un sistema en superposición que es medido por el medio ambiente externo. De hecho, como veremos más adelante, esta última situación resulta ser más interesante para abordar el problema de la adaptación biológica (Bordonaro & Ogryzko, 2013).

Todos los sistemas cuánticos observadores (IGUS) compiten con el medio ambiente por la información procedente de otros sistemas cuánticos. No obstante, el ambiente, en cuanto sumidero de información cuántica, captura mucha más información y con mayor rapidez debido a su gran tamaño, haciendo que la información confiable captada por los IGUS quede restringida a los observables que previamente han sido monitoreados. De esta manera, el DC se involucra en el debate sobre los aspectos epistemológicos y ontológicos de la mecánica cuántica, como el estatus del mundo clásico y el papel de los sistemas observadores. Podríamos discutir, en consecuencia, que la teoría cuántica describe la situación más general y universal, mientras que la física clásica sería la aproximación más adecuada para tratar sistemas muy específicos, esto es, sistemas macroscópicos que interactúan fuertemente con el medio ambiente. En otras palabras, la realidad clásica no se explicaría *a priori* a partir de argumentos universales, sino que deviene una aproximación que emerge con relación a los sistemas observadores, del modo como perciben el universo. La selección de estados preferidos por el entorno es la garantía de la confiabilidad de los registros con los observables (Zurek, 1991, 1998a, 1998b; Tegmark, 1999). Los estados estructurales del sistema observador constituyen el registro de información estable seleccionado por el entorno. No obstante, en un sistema observador no se actualizan al mismo tiempo distintos estados estructurales, dado que la superposición es información potencial. Para poner un ejemplo, a nivel individual, una célula *toti-potente* puede tomar una vía de desarrollo u otra dependiendo del contexto bioquímico; asimismo, a nivel poblacional, unas subpoblaciones podrían actualizar un estado y otras otro, dependiendo de las condiciones ecológicas.

Se sigue de estas discusiones que la distinción entre ser (lo ontológico) y conocer (lo epistemológico) pierde todo fundamento. Esto quiere decir que no hay información sin interpretación por parte del sistema observador. En este punto de la discusión afirmo que los agentes observadores y el entorno conforman una unidad que se ha querido explicar desde la cuántica por el entrelazamiento. El vector de estado del sistema es real en la medida que es capaz de transmitir información a los vectores de estado del medio ambiente. Lo que denominamos realidad es el resultado de la capacidad del sistema de imprimir copias de los estados de sus vectores ortogonales en el medio ambiente, combinado con la capacidad del medio ambiente de definir qué conjunto de los estados del vector ortogonal se expresarán en el sistema. La transmisión exitosa de información del sistema cuántico al medio ambiente produce la impresión de la información del sistema en los estados del medio ambiente, de manera que solamente cuando los vectores de estado del medio ambiente son ortogonales se puede afirmar que el medio ambiente contiene un registro definido del sistema.

Se discute en qué medida IGUS semejantes generan una misma imagen de la realidad externa, puesto que en caso de no hacerlo se violaría el criterio de objetividad, según el cual ante un mismo fenómeno, diferentes observadores deben percibir lo mismo. En este punto, el “darwinismo cuántico” explica los fundamentos de la objetividad. Con el ánimo de salvar grados de objetividad en contra de un relativismo subjetivista extremo, Zurek (2009) considera que si la información dispersa en el ambiente fuera redundante y se repitiera en muchas copias, IGUS diferentes terminarían por capturar la misma información y llegarán a un acuerdo colectivo sobre el mundo externo ⁸. En otras palabras, no habría objetividad, sino redundancia de la información disponible en el medio ambiente, puesto que predomina la información observable que proviene de un conjunto de “estados preferidos”, una vez que la mayoría de las superposiciones han sido eliminadas y no tienen posibilidad real de actualizarse en el medio ambiente determinado que estamos considerando. Por tanto, los “estados preferidos” en superposición dan lugar a los estados observados, mediante las mediciones ejecutadas por el entorno poblado por IGUS, entorno que a su vez contiene la impresión o el reflejo de los estados preferidos. De esta manera, cuando se establece un encaje estructural y funcional o, mejor, un entrelazamiento entre los sistemas vivientes y algún elemento del entorno, las propiedades de este último determinan el tipo de información potencial que pasa del sistema cuántico al medio ambiente (es decir, que se actualiza).

De acuerdo con esta propuesta teórica, la existencia de un mundo clásico solamente se puede explicar desde la perspectiva de los sistemas al interior de un medio ambiente local determinado. La explicación del universo como una totalidad implicaría aceptar una megasuperposición cuántica compatible con la función de onda de Schrödinger, pero indescriptible dada la inexistencia de un observador externo que pueda medirla. Por esta razón, la perspectiva internalista es realista ya que explica la experiencia compartida que poseemos de un mundo clásico objetivo, sometido a leyes. Desde esta perspectiva, el universo es una red de sistemas cuánticos abiertos (observadores y observados) que interactúan mediatizados por el ambiente y que por lo tanto están sujetos a la adopción de una mezcla de estados posibles permitidos por la selección inducida por entorno.

EL DARWINISMO CUÁNTICO Y SUS IMPLICACIONES
PARA EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS

La discusión gira en torno a la hipótesis según la cual, los sistemas cuánticos, incluyendo dentro de éstos a los sistemas vivos, actúan como agentes que al interactuar entre ellos en el contexto de un medio ambiente local

provocan no bifurcaciones de la función de onda, sino pérdidas parciales de la coherencia que conducen a una sucesión de afinamientos estructurales que dan lugar a la adaptación a su entorno local. A diferencia de la teoría de los MM de Everett, donde todos los mundos posibles coexistirían en superposición, para la biología los agentes que se manifiestan o actualizan en el medio ambiente se enfrentan a la competencia darwiniana que define la viabilidad de las formas actualizadas. En consecuencia, no todos los linajes se siguen bifurcando indefinidamente y entonces sólo los seleccionados favorablemente dejan descendencia modificada en las siguientes generaciones.

Existe una analogía profunda entre la selección de estados virtuales en superposición a nivel de sistemas cuánticos individuales y la selección darwiniana en una población de formas en el mundo real. Aun así, hay que subrayar la diferencia entre estas dos situaciones. En el primer caso se trata de "competencia entre estados virtuales en superposición en sistemas cuánticos individuales" por su supervivencia como información actualizada en un medio ambiente con espacio limitado, y en la segunda de "competencia en una población de individuos clásicos" por recursos energéticos para transmitir su información a la descendencia. No obstante, de acuerdo con Campbell (2010), el DC satisface los criterios del darwinismo universal establecidos entre otros por Dawkins (1976), Dennett (1995) y Blackmore (1995). Si seguimos con estos criterios, todo proceso darwiniano de evolución adaptativa se caracteriza por realizarse en tres pasos: 1) replicación o reproducción; 2) generación al azar de una población de variantes genéticas heredables, y 3) supervivencia diferencial de la descendencia por razón de estas variaciones. Cualquier población que cumpla estos tres pasos, independientemente de cuál sea su composición material, evolucionará indefectiblemente hacia una mayor supervivencia y adaptación.

Para entender mejor la justeza de la apropiación por parte de la física cuántica del concepto de selección darwiniana, que se creía exclusivo de la biología, comencemos por recordar que el comportamiento que observamos de las partículas subatómicas está reñido con la experiencia que poseemos del mundo macroscópico. Por ejemplo, un electrón no sigue una trayectoria predecible y definida sino que en el intervalo entre las mediciones se encuentra simultáneamente en una superposición de todas las trayectorias posibles, mientras que al medir la posición colapsa en uno de los muchos estados posibles. Para ello basta con que el electrón interactúe con otra entidad del entorno, el aparato de medida. Zurek (2003, 2009) precisa que no podemos medir al electrón directamente, sino que medimos una pequeña parte del medio que lo circunda, capturando la información que necesitamos para inferir su posición. En este caso, el electrón interactúa con el ambiente y deja una huella, de modo que cada fracción

del ambiente tiene apenas una parte de la información del estado cuántico original, y en consecuencia los estados preferidos se reproducen en una multiplicidad de copias similares, aunque no enteramente idénticas a la original. Al tener en cuenta que el entorno local cambia, el estado del electrón debe adaptarse produciendo nuevos estados "sucesores" dotados con propiedades aptas para la estabilización y propagación (sobrevivencia). Los estados cuánticos se definen de acuerdo con la información que transportan, pero la cantidad de información que el ambiente puede incorporar es limitada y por eso los estados "sucesores" deben competir para existir o de lo contrario se pierden incrementando la entropía del ambiente circundante. Es decir, que los medioambientes, entendidos como subregiones del universo, resultan ser disímiles, puesto que el estado cuántico inicial ha dejado huellas o, mejor, producido "estados sucesores" ligeramente diferentes entre sí, mientras que los no seleccionados no sobreviven y la información que contienen se vuelve ilegible e inmensurable para otros observadores. Si se considera que la cantidad de información que una cierta región del ambiente puede contener es limitada, podemos hablar de competencia por un recurso limitado, donde los estados más adaptados al ambiente en el que puede replicarse constituyen los estados que en efecto pueden medirse y que consideramos como reales. En otras palabras, los estados cuánticos seleccionados se propagan dejando copias ligeramente diferentes que contienen una parte de la información original. La condición que permite a un estado sobrevivir al menos lo suficiente como para integrarse a su entorno (subregión del universo), se convierte en un hecho objetivo, dependiendo de la configuración local del ambiente en un momento dado.

No obstante la justeza de esta analogía, para que la evolución adaptativa tenga lugar no es suficiente con el algoritmo darwiniano de Dawkins, Dennet y Blackmore, sino que se requiere que los sistemas adaptativos posean un "modelo interno" del efecto del medio ambiente sobre el sistema y del sistema sobre el medio ambiente (Campbell, 2010), y esto es justamente lo que el modelo de Zurek proporciona. La implementación física del "modelo interno" equivale a la evolución del vector de estado en un espacio de Hilbert que se pone al día generación tras generación mediante la selección de las variantes adaptadas, y con ello el sistema optimiza el resultado adaptativo mediante el cambio de sus interacciones con el ambiente. Los sistemas adaptativos implementan un "modelo interno" mediante el cual simulan las interacciones del sistema cuántico con el entorno y eligen los estados preferidos que en efecto pueden ser actualizados en el mundo real. Dicho de otra forma, los sistemas adaptativos funcionan "como si" anticiparan los resultados de su interacción con el ambiente y en consecuencia ejecutan las acciones favorables. Según esta interpretación, los sistemas adaptativos poseen la habilidad para adquirir,

almacenar y procesar información, es decir, se comportan como los IGUS descritos. La adaptación tiene una explicación semiótica, puesto que la posesión de un modelo interno permite interpretar como señales informativas las perturbaciones físicas del entorno.

LA INDUCCIÓN DE MUTANTES ADAPTATIVOS POR LAS CONDICIONES DE CULTIVO Y SELECCIÓN SEGÚN BORDORANO Y OGRYSKO

Para definir si las mutaciones que confieren a las bacterias resistencia a los fagos ocurrían al azar o, por el contrario, estaban influenciadas por un factor del medio ambiente, Luria y Delbruck (1943) estudiaron cientos de cultivos independientes en presencia del fago; contabilizaron las colonias producidas en cada uno y constataron que la aparición de mutantes resistentes mostraba una fluctuación estadística muy alta. Concluyeron que los mutantes aparecían espontáneamente e independientemente de las condiciones de selección, es decir, al azar, confirmando el modo neodarwiniano de evolución. Posteriormente, Cairns, et al. (1988) examinaron la aparición de mutaciones que revertían el gen inactivo β -gal(-) a su estado silvestre inicial β -gal(+), en presencia de lactosa en el medio, y obtuvieron una fluctuación mucho más baja, la cual se interpretó como una consecuencia de las condiciones de cultivo y selección que inducían en las bacterias la producción de mutantes adaptados. Más aún, se constató que las mutaciones no aparecían a consecuencia del estrés que implicaba tener las bacterias sin lactosa antes de su adición al medio, sino que entre más tarde se añadía lactosa al medio, más tarde aparecían los mutantes. Los mutantes Lac(+) aumentaban con la presencia de lactosa en el medio de cultivo, en respuesta a la presión selectiva a una tasa cien veces mayor que los controles cultivados en experimentos paralelos en ausencia de lactosa. Las mutaciones Lac(+) no se acumulaban en las bacterias en ayuno, lo cual es indicativo de que la aplicación del medio selectivo causa la aparición de los mutantes adaptados. Este fenómeno se ha confirmado para otras bacterias y organismos eucarióticos como levaduras en presencia de lactosa y en ausencia de aminoácidos importantes (Hall, 1992; Steele & Jinks-Robertson, 1992).

Se ha propuesto una diversidad de mecanismos moleculares para explicar la producción de variantes adaptadas que aunque operan por líneas causales diferentes se coordinan entre ellos para dar lugar a la adaptación como fenómeno emergente (Cairns, et al., 1988; Foster & Cairns, 1992; Hall, 1991, 1997; Shapiro, 2013). Por ejemplo, un protón localizado en dos sitios adyacentes dentro de una misma base nucleotídica define los estados tautoméricos: (ceto-Guanina \rightarrow enol-Guanina), de manera que el paso del primero al segundo provoca una mutación por incorporación errónea en la cadena complementaria del ADN de T en lugar de C, la cual se traduce

en una sustitución (Arg → His) que genera la forma activa de la enzima β -gal(+). En este caso, las mutaciones adaptativas serían inducidas por moléculas de lactosa presentes en el medio de cultivo que restringen la posición de protones dentro del ADN (McFadden, et al., 1999), un caso en el que la célula actúa como agente de medición. No obstante, para que la célula guarde, así sea transitoriamente, información sobre los errores de transcripción en el ARN mensajero y de replicación en el ADN que resultaron ser favorables fenotípicamente, se necesita que la célula en estado estacionario, en ayuno, haya sido capaz de retroalimentar información ambiental y genética simultáneamente. Por tanto, la sola pérdida de los estados tautoméricos es insuficiente para explicar la correlación entre ARN, ADN, proteínas, célula y medio externo.

Por otra parte, hay argumentos suficientes para justificar la hipótesis según la cual, la bacteria en sí misma es una entidad en estado de superposición no como un "gato de Schrödinger", sino que puede ser descrita como una superposición de las funciones propias del operador que representa el observable que define las probabilidades de aparición de los mutantes como consecuencia del cultivo en un medio con lactosa. En este caso, tendríamos que la medición cuántica es efectuada directamente por el medio externo que equivale a las condiciones y modo de cultivo de las bacterias, las cuales definen las características del observable en función de la capacidad de metabolizar la lactosa presente en el medio. Para explicar la adaptación habría que distinguir entre estados "puros" y "mixtos". Los estados puros se describen por el vector de estado ($|\psi\rangle$) que representa una superposición de estados propios del operador relevante, que refleja así la incertidumbre debida al desconocimiento del peso relativo de cada componente ortogonal en la superposición. El estado puro define una bacteria en su conjunto, incluyendo la secuencia específica de ADN a partir de la cual emergen las mutaciones dirigidas como resultado de la medición (Ogryzko, 1997). Por otra parte, los "estados mixtos" decoherentes son independientes del estado puro y preexisten a la selección.

En este ejercicio se concibe la bacteria como un objeto natural y su observable la capacidad para propagarse en condiciones específicas, el cual puede ser medido en experimentos de cultivo en caja de Petri. La composición del medio de cultivo y las condiciones de incubación constituyen la medición, un proceso irreversible, en el que la interacción del sistema cuántico (bacterias) con su entorno conduce a resultados impredecibles.

La base preferida para la descripción de un sistema macroscópico define los estados del sistema que sobreviven la interacción con el ambiente. Al cambiar el entorno cambian los estados preferidos compatibles con el nuevo entorno y por tanto la base preferida cambia (Zurek, 1993). Para

describir la adaptación basta con definir las condiciones de medición, de modo que el estado de la bacteria se descompone en combinaciones lineales de las funciones propias del operador correspondiente. Dependiendo de las condiciones de medición, el estado de la célula debe ser descompuesto en una combinación lineal de las funciones propias del operador correspondiente.

Por ejemplo, en un ambiente inicial

$E_0: |\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + c_3|\psi_3\rangle$, sea $|\psi_1\rangle =$ estado reproducción y crecimiento, $|\psi_2\rangle =$ estado de latencia o estacionario y $|\psi_3\rangle =$ muerte celular.

Otro medio selectivo corresponderá a un operador diferente que da lugar a una descomposición diferente del mismo vector de estado (en función de las proyecciones ortogonales diferentes que se han producido al rotar el ángulo que describe el vector de estado en el espacio de Hilbert), de modo que al cambiar el ambiente tenemos

$$E_1: |\phi\rangle = b_1|\phi_1\rangle + b_2|\phi_2\rangle + b_3|\phi_3\rangle.$$

Cuando un estado en superposición de una célula coincide con el estado preferido, se estabilizará y sobrevivirá a la decoherencia. Asumamos que el estado preferido se describe como una superposición:

$$|\psi_0\rangle = 1|\psi_1\rangle + 0|\psi_2\rangle + 0|\psi_3\rangle.$$

Con el cambio de medio ambiente, la base preferida cambia, es decir, cuando las bacterias se someten a nuevas condiciones de selección estamos permitiendo que al menos un miembro de la superposición se amplifique irreversiblemente. Por tanto, el nuevo estado celular $|\psi_0\rangle$ debe ser descompuesto de forma diferente:

$$|\psi_0\rangle = c_1|\phi_1\rangle + c_2|\phi_2\rangle + c_3|\phi_3\rangle.$$

En consecuencia, una superposición que era estable en un medio ambiente se hace inestable en otro y eventualmente se convierte en uno de los estados de la nueva base preferida, es decir, la adaptación se representa por:

$$|\psi_0\rangle = 1|\phi_1\rangle + 0|\phi_2\rangle + 0|\phi_3\rangle \text{ puesto que } (|\psi_1\rangle = |\phi_1\rangle).$$

Al cambiar el entorno, el mismo vector de estado se describe como una superposición consistente con la medición de observables diferentes o de diferentes funciones propias del operador dado. Cada bacteria con un genoma silvestre (no mutante) tiene cierta probabilidad de manifestarse como mutante durante su cultivo en un medio específico (medición). El medio selectivo no detecta mutantes ocurridos al azar, sino que provoca su aparición; más aún, la adaptación no es un cambio en la probabilidad con la que aparecen mutantes individuales, sino un cambio en el tipo de eventos que hacen que el fenómeno sea adaptativo, es decir, la adaptación depende del tipo de resultados impuestos por las condiciones de medición (Ogryzko, 1997). Podría decirse que la aparición de mutaciones dirigidas

ocurre al azar, pero entendiendo que la elección azarosa tiene lugar solamente entre estados preferidos retenidos por las condiciones medio-ambientales. Al contrario de lo que afirma el neodarwinismo, las variantes seleccionadas no surgen como estados mixtos preexistentes a la selección, sino a partir de componentes virtuales de un estado puro. No se trata de la SN ejercida sobre una población de mutantes generados al azar, sino de la selección “estados virtuales” a nivel de cada sistema individual. En este sentido la adaptación funciona de acuerdo con el esquema lamarckiano (Bordonaro & Ogryzko, 2013).

El formalismo de la cuántica es apropiado para describir la inseparabilidad entre las condiciones de selección y la aparición de mutantes adaptados. A diferencia de los modelos poblacionales desarrollados por el neodarwinismo, no se afirma que la amplia variabilidad evolutiva se realiza en la población sino que cada organismo individual tiene en sí suficiente plasticidad como para asegurar el potencial evolutivo. Recordemos que no se trata de SN de una población de organismos variantes al azar, sino de selección inducida por el medio ambiente en una “población de estados virtuales individuales”.

Este modelo describe a una célula individual como una entidad en superposición con respecto a algunas de sus propiedades. La base utilizada para representar un estado en particular como una superposición depende de lo que se mida. La hipótesis de la célula en estado de superposición debe ser puesta a prueba a medida que se investigue la estructura física de la materia y los procesos intracelulares. De esta manera, se podrá establecer cómo se dan las correlaciones entre moléculas y eventos al interior de las células individuales. Es decir, necesitamos recurrir a la noción de “entrelazamiento”, un fenómeno que se manifiesta como una correlación no clásica entre diferentes eventos dentro de una célula. Si consideramos que una célula consiste de muchas partículas interactuantes en un estado físico que corresponde a la materia condensada, el entrelazamiento entre las diferentes moléculas (ADN, ARNs, proteínas) no es difícil de imaginar. Si los procesos físicos al interior de la células fueran reversibles, se superaría el marco explicativo dado por la irreversibilidad del dogma central de la biología molecular ($ADN \leftrightarrow ARN \rightarrow Proteína$). Si hubiera reversibilidad no habría pérdida de información y, en consecuencia, el sistema “recordaría” los eventos genéticos correlacionados con la producción de proteínas útiles, pero para que esto sea posible la célula debería poder ser descrita como un estado de superposición. En este modelo, Ogryzko, et al. (1997) y Bordonaro, et al. (2013) asumen que la bacteria en ayuno, en ausencia de actividad metabólica entra en un estado de latencia cuya dinámica tendría un carácter unitario dado por la superposición de los distintos componentes. Los procesos moleculares intracelulares en la célula en ayuno evolucionarían unitariamente de acuerdo con

la ecuación de Schrödinger, lo que permite mantener un registro de los errores útiles a nivel del ARN y del ADN.

La decoherencia inducida por el entorno tendría el efecto positivo de mantener a la célula en superposición de estados (silvestre y mutante), estabilizando correlaciones no clásicas en la célula en E_0 , la cuales se desestabilizan en el ambiente E_1 . La bacteria en condiciones de ayuno está en un estado seleccionado por E_0 , se trata de un objeto macroscópico en superposición de algunos estados propios de un operador particular. En un experimento de cultivo sin fuente energética es imposible distinguir entre los estados, latente estacionario, mutantes y tipo silvestre.

$$(E_0) \Rightarrow |\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + c_3|\psi_3\rangle$$

Al cambiar el medio $E_0 \Rightarrow E_1 \Rightarrow E_2$ aparecen transiciones discontinuas entre distintas clases de estados preferidos. Si cultivamos las bacterias en medio con glucosa, tenemos:

$$(E_1) \Rightarrow |\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_3|\psi_3\rangle$$

Ahora el medio permite distinguir entre el estado estacionario y los demás, pero el mutante Lac(+) y el silvestre permanecen en superposición, uno de los componentes de la superposición se amplifica y la bacteria crece exponencialmente. Si cambiamos una vez más el medio, cultivando las bacterias en presencia de lactosa (E_2), podemos distinguir entre el estado silvestre y mutante, toda vez que se favorece la proliferación de este último. De esta manera, podríamos aceptar que las bacterias en ayuno se adaptan de un modo lamarckiano dado que pueden recordar los eventos genéticos que conducen al fenotipo adaptado en las condiciones de un medio ambiente determinado. Postular que la bacteria o en general una célula está en un estado de superposición cuántica permite descubrir en el individuo una plasticidad intrínseca suficiente para explicar la fuente de variabilidad requerida para la evolución. De hecho, en este punto se apoyan las teorías epigenéticas de la evolución que se basan en la capacidad de acomodarse y ajustarse a un ambiente determinado mediante la retroalimentación de información ambiental que orienta la elección de ajustes estructurales internos y las consiguientes acciones proyectadas al exterior.

EL FORMALISMO CUÁNTICO EN LA MODELACIÓN DE PROCESOS EPIGENÉTICOS SEGÚN ASANO

De acuerdo con Oyama (2000), la información surge, se manifiesta o actualiza durante el desarrollo embriológico mediante la confluencia de una gran diversidad de factores formativos que además de los genes, incluyen factores celulares, hormonales, nutricionales, ambientales, sociales, conductuales, culturales, etc., que participan en el proceso morfo-genético. Es decir, que la información biológica no se debe únicamente a los

genes, sino a la coincidencia de todos los factores formativos, tanto internos como externos, que en un momento y lugar determinados inciden sobre un sistema viviente. En esta perspectiva, la evolución adaptativa es el resultado de la ontogenia, entendida como una sucesión de ajustes físicos estructurales y funcionales que se estabilizan por interacciones epigenéticas en un contexto medio ambiental determinado (Jablonka & Lamb, 1998, 2006). En este sentido, el formalismo de la física cuántica puede ser apropiado para describir la plasticidad fenotípica de los organismos en respuesta al ambiente. Esta idea se ilustra recurriendo al "paisaje epigenético" de Waddington (1957), Slack (2002) (ver figura 4).

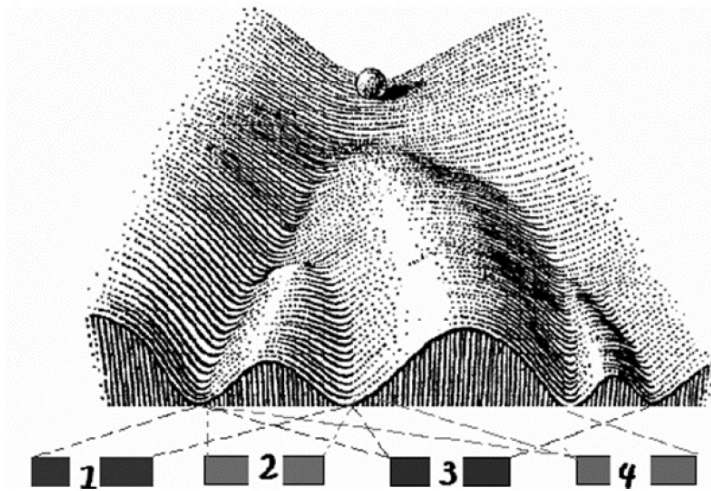


FIGURA 4. (Figura modificada a partir de Waddington (1957), (Slack, 2002). El paisaje epigenético ilustra cómo las vías de desarrollo celular se habilitan en puntos de bifurcación a medida que el proceso transcurre de un estado indiferenciado inestable (célula totipotente, arriba) a estados diferenciados estables (células diferenciadas, abajo) La superficie curva ondulada representa la modulación de las vías de desarrollo como consecuencia de la interacción permanente de la célula con el medio ambiente. Los cuadros numerados abajo representan las redes génicas que posibilitan la diferenciación y estabilizan las formas diferenciadas. Este modelo es susceptible de ser interpretado como un proceso de decoherencia. La bola arriba representaría una célula en un estado de superposición, coherencia o estado "quantum-like" (QL) que posee un potencial intrínseco. Las bifurcaciones representarían puntos inestables en los que se decide una de las alternativas estructurales accesibles, por pérdida de coherencia que conlleva subsiguientes restricciones morfo-genética. Los valles representarían las vías estables canalizadas donde actúan las restricciones generadas o manifiestas en estados de decoherencia cuya profundidad correspondería a los umbrales de estabilidad termodinámica propios a los "estados preferidos" de Zurek y al entrelazamiento con el medio ambiente.

Para Asano, et al. (2013) las epimutaciones ⁹ moleculares inducidas por el ambiente son responsables de características transmisibles de la célula madre a la hija. A lo largo de la epigénesis, las células en proceso de diferenciación y en interacción con el entorno circundante eligen de modo consistente el patrón de epimutaciones que las conducen a un acoplamiento con el medio circundante. En el modelo se asume que la célula parte de un estado de alta incertidumbre acerca de los posibles cambios epigenéticos que pueden generarse en la interacción con el medio circundante. Incertidumbre que se resuelve en unos estados epigenéticos definidos por la interacción y el acople con el entorno. El paso de la superposición a la decoherencia permite entender por qué a medida que las células se diferencian se hacen más estables, entrelazándose con el ambiente circundante. Es decir, un proceso análogo a la decoherencia cuántica en el que el estado de superposición inicial en interacción con el medio ambiente da lugar a una distribución estadística de estados clásicos.

A diferencia del modelo neodarwiniano, según el cual las mutaciones genéticas ocurren al azar y el medio ambiente selecciona los organismos más adaptados en la población, el modelo epigenético neolamarckiano sostiene que los cambios en la estructura del epigenoma son inducidos por el medio ambiente y se heredan a la siguiente generación. Este proceso se describe en tres pasos: 1) la generación de epimutaciones; 2) la selección de las epimutaciones, y 3) la estabilización del fenotipo.

La teoría de sistemas cuánticos abiertos provee del formalismo necesario para elaborar una descripción operacional mínima de los datos estadísticos útiles para hacer predicciones. Al ser la célula un sistema complejo compuesto por millones de subsistemas, el uso operacional del entrelazamiento sirve para representar la dinámica de las correlaciones del sistema (S) y el impacto sobre el medio ambiente (E). Habría que representar el conjunto de todos los estados epigenéticos posibles (por ejemplo, las modificaciones epigenéticas en el ADN dadas por metilación de las bases citosinas) asociadas a los diferentes fenotipos posibles. Por otra parte, habría que estar en capacidad de representar todas las configuraciones medioambientales posibles asociadas a los diferentes fenotipos posibles. El entrelazamiento entre S y E, descrito por productos tensoriales ¹⁰, daría lugar a espacios de enormes dimensiones que describirían la dinámica del epigenoma, dado que cambios en la expresión de un solo gen inciden inmediatamente en la expresión de otros genes.

La evolución de los estados epigenéticos en células individuales se podría tratar mediante una función de onda (vector normalizado en el espacio complejo de Hilbert), de acuerdo a una ecuación que describe la dinámica interna del sistema y las posibles interacciones con el medio ambiente. Para ello se propone utilizar la ecuación de Lindblad (GKSL ¹¹) que permite describir las transiciones de estados de incertidumbre dados

por la superposición a estados de decoherencia descriptibles estadísticamente. De esta manera, se representa la dinámica interna del estado epigenético de las células (las fluctuaciones epigenéticas a lo largo del tiempo), pero a diferencia de la dinámica de Schrödinger, se incluye el operador W determinado por el entorno (E) que elimina fluctuaciones y que conduce a la solución correspondiente al estado estacionario, es decir, el fenotipo estable. El resultado de esta evolución correspondería a un estado estacionario que describe la distribución de probabilidad límite de las epimutaciones presentes en una población de células como consecuencia de la interacción con E (Asano, et al., 2013).

Consideremos el gene g y asumamos que la célula interactúa con un medio ambiente tal que provoca una epimutación μ en g que cambia los niveles de expresión de g . Ignorando la presencia de otros genes, se modela la mutación μ considerando un espacio bidimensional de estados: H_{epi} . Los estados de epimutación (m) y preservación (p) de la estructura epigenética relacionada a la expresión de g se representan por dos vectores ortogonales unitarios $|m\rangle$ y $|p\rangle$, respectivamente. Por tanto, el estado epigenético puede ser representado como superposición:

$$|\Psi_{\text{epi}}(t)\rangle = C_m(t) |m\rangle + C_p(t) |p\rangle$$

donde la fluctuación en las amplitudes $C_m(t)$ y $C_p(t)$ son contrarrestadas por la acción del medio ambiente (el operador W).

Para representar el "entrelazamiento" de las diferentes epimutaciones en el genoma, se propone representar el estado del epigenoma para una célula a partir de un genoma consistente de m genes g_1, \dots, g_m , asignando a cada gene g todas las epimutaciones posibles enumeradas de 1 a K ($j_g = 1, \dots, K_g$). El estado de todas las epimutaciones posibles en cada gene se representa como la superposición: $|\Psi_g\rangle = \sum_j c_{gj} |j_g\rangle$ donde $\sum_j |c_{gj}|^2 = 1$.

Si las epimutaciones en genes diferentes son independientes entre ellas, entonces el estado (QL) del epigenoma celular se representa por el producto tensorial de los estados $|\Psi_g$

$$|\Psi_{\text{epi}}\rangle = |\Psi_{g_1}\rangle \otimes \dots \otimes |\Psi_{g_m}\rangle$$

Pero en las células, para la mayoría de los genes no hay epimutaciones independientes, puesto que el ADN, los ARNs y las proteínas están intrincados formando una red en la que una epimutación afecta a otros genes. Por tanto el formalismo utilizado para los estados más generales de entrelazamiento cuántico sirve para describir las epimutaciones de todos los genes en el genoma celular (Asano, et al., 2013).

$$|\Psi_{\text{epi}}\rangle = \sum_{j_{1\dots m}} c_{j_{1\dots m}} |j_{g_1\dots g_m}\rangle$$

$$|j_{g_1\dots g_m}\rangle = |j_{g_1}\rangle \otimes \dots \otimes |j_{g_m}\rangle$$

El espacio dado por el producto tensorial de las epimutaciones posibles en el genoma celular representa el hecho que las epimutaciones en un gene involucran epimutaciones inmediatas y consistentes de otros genes, por

ejemplo, un cambio en el ambiente del gene g_1 induce no sólo una epimutación en éste, sino en otros genes. Este modelo permitiría capturar la no localidad y casi simultaneidad epigenética en una célula viva. Por el contrario, el gradualismo darwiniano sería incapaz de explicar la rapidez de la evolución epigenética. La evolución en el caso de grandes números de genes sería muy lenta si las epimutaciones que inducen nuevos niveles de expresión génica fueran generadas con independencia del azar antes de ser seleccionada. Si el medio ambiente actúa sobre genes $g_1 \dots g_n$, supongamos que para un gen individual, g_1 , una epimutación Mg_1 puede ser ventajosa, y sería seleccionada. Pero en caso de que esta epimutación perturbe negativamente el funcionamiento de otros genes, no podríamos explicar cómo las epimutaciones (Mg_1, \dots, Mg_n) inducidas por el medio ambiente dan lugar a patrones consistentes de expresión génica. Si por iteración se producen epimutaciones ($Mg_1 \dots Mg_n$), la célula percibe la descoordinación entre los niveles de expresión génica, y nuevas epimutaciones se inducirían por esta inconsistencia y así sucesivamente. Un proceso de esta naturaleza inspirado en el gradualismo darwiniano tomaría mucho tiempo en comparación a las escalas de tiempo correspondiente al ciclo de vida de una célula. Si por el contrario, la dinámica de las epimutaciones está entrelazada, en un solo paso todas serían consistentes.

De acuerdo con Sollars, et al., (2003), un modelo de evolución epigenética basado en sistemas cuánticos QL (*quantum-like*) controlados por el entorno en combinación con el entrelazamiento entre diferentes genes se ajusta muy bien al modelo de canalización epigenética descrito como los valles profundos del paisaje epigenético de Waddington (figura 4).

Además, la idea de "propagación del entrelazamiento" hace razonable la herencia epigenética descrita por Jablonka y Lamb (1998, 2006), y por consiguiente contribuiría enormemente a desmontar los argumentos que se han esgrimido en contra de la herencia de los caracteres adquiridos. El enfoque neodarwiniano, basado en mutaciones azarosas e independientes antes de la selección, es incapaz de explicar esta rápida dinámica evolutiva que permite la coordinación de diferentes cadenas causales, y que contribuye simultáneamente tanto a la estabilidad como a la plasticidad de los fenotipos, condición que favorece la adaptación.

RECAPITULACIÓN Y DISCUSIÓN FINAL

Hemos discutido cómo la teoría de la decoherencia inducida por el entorno no define fronteras tajantes, claras y precisas entre los dominios clásico y cuántico (Zurek, 2002, 2003). Pareciera entonces que ni el estado cuántico ni el clásico se realizan completamente, sino que la realidad corresponde a estados intermedios ubicados entre estos extremos. Por tanto, el principio lógico del tercero excluido, según el cual la realidad sería o completa-

mente clásica o completamente cuántica no se cumple. El dominio cuántico potencial ¹² siempre está en proceso inacabado de actualización, y por ello no se acomoda a este principio lógico, el cual se restringiría exclusivamente para el caso de entidades reales, es decir, actualizadas y discretas altamente determinadas. Lo general va con lo potencial y lo específico con lo actual. Por esta razón, la descripción de los sistemas vivientes requiere del uso simultáneo del formalismo clásico y además de formalismos cuánticos con diferentes bases preferidas de acuerdo con los observables examinados ¹³ (Rosen, 1985, citado por Mikulecky, 2001). Con todo, más que oponer el mundo clásico y el cuántico, lo más conveniente sería considerar para los objetos macroscópicos tanto propiedades clásicas como cuánticas, así como el fotón tiene propiedades clásicas y cuánticas. Kitto (2014) ha justificado la aplicación del formalismo de la cuántica a sistemas contextualizados, además de que nociones como superposición, no localidad, entrelazamiento, etc., serían susceptibles de ser desarrolladas y precisadas una vez sean extrapoladas a la biología ¹⁴. Recordemos que los sistemas cuánticos pasan de la superposición (información potencial) a un conjunto de estados preferidos, a partir de los cuales se decide la actualización de algunas formas, mediante la captura selectiva de señales presentes en el entorno y procedentes de los sistemas con que interactúa. De este modo, podemos justificar las bases físicas de la transformación al considerar que los sistemas biológicos siempre están en proceso de actualización y, por tanto, nunca se comportarían completamente como clásicos.

En esta línea de argumentación, la búsqueda de correlaciones causa efecto, debería enmarcarse dentro del esquema de interpretación aristotélico, donde la transformación y el cambio se conciben como el paso de la potencia al acto ¹⁵; la primera describible en términos compatibles con la mecánica cuántica y la termodinámica de sistemas lejos del equilibrio, y el segundo abordable desde la perspectiva clásica newtoniana y la mecánica estadística para sistemas cercanos al equilibrio.

La existencia en el entorno de información de los sistemas y en ellos de información incorporada procedente del entorno, sería la clave para entender por qué a medida que los sistemas interactúan y reajustan, la superposición y el entrelazamiento nunca desaparecen por completo. El entorno actúa reteniendo y favoreciendo la propagación de los estados virtuales preferidos, y destruye las superposiciones no adaptadas. Así las cosas, el entorno se convierte en el agente causal de la forma por cuanto actúa directamente sobre el potencial latente restringiéndolo a los estados realmente accesibles y susceptibles de ser actualizados. Con más exactitud, la interacción entre sistema y entorno da lugar a superposiciones nunca completamente resueltas al interior de los sistemas cuánticos (incluyendo los sistemas vivientes) y, en ese sentido, se justifica también el modo lamarckiano de evolución. El ambiente es altamente heterogéneo y a lo

largo del proceso evolutivo se modifica al conformar un tejido de relaciones espacio temporal en el que se desenvuelven las historias consistentes que han sido seleccionadas del conjunto de historias posibles. El espacio-tiempo de relaciones está conformado por una red de sistemas observadores que cada cual experimenta a su manera, que no obstante posee rasgos uniformes compartidos para diferentes observadores, gracias a la información redundante presente en el entorno.

Estas reflexiones sobre el papel del medio ambiente reditan y actualizan las reiteradas discusiones sobre la pertinencia de los enfoques sistémicos, si consideramos que proveen explicaciones favorables a la adaptación mucho más eficientes que el ciego "ensayo y error". Por ejemplo, las investigaciones sobre la recolección de fotones han mostrado que la alta eficiencia en el transporte de "excitones" hacia los centros de absorción (FMO) se debe a la coherencia cuántica (Engel, et al., 2007). Es como si las ondas cuánticas coherentes simultáneamente explorarían todas las opciones posibles y, automáticamente, seleccionarían el camino más eficiente al centro de reacción. La mecánica cuántica explica cómo el medio ambiente suministra información adicional a los sistemas adaptativos, de modo que la exploración de configuraciones adaptativas es menos aleatoria y ciega de lo que cabría suponer si nos basamos exclusivamente en las permutaciones posibles de sus partes constitutivas. Igualmente se podría argüir que la información disponible en el medio ambiente incide eficientemente en la aparición de mutaciones genéticas y modificaciones epigenéticas que optimizan la adaptación al medio.

Los dos modos de actuar del medio ambiente, como factor en la generación de las variaciones y como filtro de las mismas, serían uno mismo, lo que evitaría continuar con la polarización que han caracterizado las discusiones entre neolamarckismo y neodarwinismo. Sólo si superamos estos esquemas clásicos será posible explicar la adaptación biológica. El ajuste recíproco (estructural y funcional) del organismo con su medio ambiente se daría mediante el entrelazamiento, hecho que invita a pensarlos como un sistema unificado.

Un marco teórico inspirado en la mecánica cuántica explicaría por qué es imposible separar la generación del espectro de variantes poblacionales de las condiciones de selección impuestas por el entorno. En otras palabras, la aparición de variantes no obedece a una ley determinista, ni se generan al azar antes de la exposición al medio ambiente donde la selección tiene lugar, sino que se producen de un modo indeterminado y contingente, precisamente como consecuencia de la interacción de los organismos con dicho entorno. El lamarckismo ha defendido la influencia directa del medio ambiente en la producción de las formas de vida, así como la indirecta dada por el uso y desuso en respuesta a dicho medio, lo que implicaría que el morfo-espacio de lo posible se restringe a los "estados

preferidos". La topología del morfo-espacio de lo realmente posible o accesible presentaría zonas muy definidas de modo discontinuo, donde se aglutinarían las formas posibles, mientras que la inmensa mayoría del espacio quedaría vacío. Si tenemos en cuenta que la actualización de las formas ocurre en la interacción de los organismos con su medio ambiente a lo largo del desarrollo ontogenético, a nivel individual y filogenéticamente a nivel poblacional, el morfo-espacio de lo posible iría cambiando en la distribución de las zonas de aglomeración permitidas a medida que el medio ambiente cambia. De todas las formas actualizadas, la SN retiene y favorece unas y elimina otras en la lucha y competencia por los recursos, y en consecuencia se genera la correspondiente distribución estadística de las formas realmente existentes.

La discusión entre lamarckismo y darwinismo habría que replantearla para mostrar que la evolución no se agota con el esquema neodarwiniano de mutaciones aleatorias, sino que también hay que incluir los procesos neolamarckianos, según los cuales la generación de variantes y la fijación de las mismas en las poblaciones está condicionada por la interacción entre los organismo y el medio ambiente. Podemos afirmar que la teoría de la evolución por SN explica adecuadamente el filtrado de formas actualizadas o manifiestas en una población de acuerdo con su eficacia en un medio ambiente dado, pero se queda corta para explicar el origen del potencial autorganizativo a partir del cual surgen las formas que se actualizan. En este sentido, hablar de darwinismo cuántico puede ser un término equívoco, en cuanto se ha asociado el término 'darwinismo' con una explicación basada en la existencia de una independencia respecto al medio ambiente en la generación (actualización) de las formas variantes que son sometidas al escrutinio de la SN. Tesis que olvida que la selección inducida por el entorno genera una estructura no homogénea, sesgada en el morfo-espacio virtual de las formas accesibles o realmente posibles. Dado que las formas surgen en la interacción entre los sistemas vivientes —situados entre lo cuántico y lo clásico— y el medio ambiente, la actualización de las formas presupone un potencial informativo dado por la superposición, o estados en coherencia. El hecho de que la actualización de las formas posibles, aunque indeterminada no sea independiente del medio ambiente, ni completamente aleatoria, reivindica aspectos del modo lamarckiano de evolución ¹⁶.

Así como el darwinismo fue interpretado newtonianamente a lo largo del siglo XIX al caracterizar la SN como una fuerza o presión externa, y posteriormente dentro del esquema suministrado por la mecánica estadística a lo largo de gran parte del siglo XX para entender la evolución de las poblaciones por SN de variantes genéticas generadas al azar, en las últimas décadas el darwinismo se ha interpretado dentro del esquema de las propuestas de la teoría de la autorganización y sistemas en desarrollo que

recuperan una perspectiva sistémica y ontogenética. La interpretación por autororganización se ha hecho viable en la medida que el principio de producción de variantes al azar se relaja y se convierte en una indeterminación, dadas las condiciones de interacción con el medio que hace que la producción de variaciones se deba a un azar delimitado por ciertos umbrales de estabilidad. El siguiente paso que ocupara el siglo XXI sería una reinterpretación compatible con el esquema de la mecánica cuántica, que ponga en evidencia que un mismo formalismo aplicado a dos situaciones diferentes refleja una estructura subyacente común que todavía está por esclarecer. En este sentido, se habrá avanzado en una integración no reduccionista entre la física y biología.

Paradójicamente, el camino para avanzar en la universalización del darwinismo pasa por reconocer el principio lamarckiano de variaciones suscitadas en la interacción del organismo con el medio ambiente. Peirce (CP 6.15, 7.515) había anticipado esta situación al anunciar que la universalización del darwinismo era inevitable, siempre y cuando se mantenga un principio de variación más afín al hábito lamarckiano (Andrade, 2014b). La incorporación a la biología teórica de nociones que exigen todavía una mayor precisión como superposición, entrelazamiento, no localidad, medición cuántica... etc., además de contribuir a precisar estas mismas nociones va a significar un distanciamiento (y no una ruptura) con la tradición neodarwiniana para pasar a un tipo de neolamarckismo renovado, donde la SN sería subsidiaria de una diversidad de factores, aunque nunca el factor predominante de la evolución.

Desde una perspectiva neodarwiniana se podría afirmar que la SN favorece a los IGUS que aciertan al azar, pero en realidad se trata de sistemas que eligen sus ajustes estructurales y comportamientos con la información parcial que han logrado captar e interpretar procedente del entorno. En la naturaleza física y biológica hay contextos de interacción dado que los sistemas de interpretación o agentes de medición escogen el ajuste estructural de acuerdo como se perciben ellos mismos con relación a su entorno o mundo de significados. No hay determinismo en estas elecciones, puesto que en cada caso hay más de una alternativa accesible o más de un estado virtual preferido que pueda ser actualizado. Al tratarse de la generación y preservación de linajes evolutivos o trayectorias de vida con reducción parcial de la superposición y coherencia cuántica, podemos inferir que la evolución adaptativa tiene lugar porque los sistemas vivientes anticipan una trayectoria, de entre las muchas posibles, de vida funcional y congruente con el medio, en el contexto de las interacciones o mediciones efectuadas por una población de observadores no equivalentes (Igamberdiev, 2008). En consecuencia, la explicación física de los sistemas vivientes queda enmarcada dentro de una interpretación semiótica, ya que es imposible dejar de concebir a los sistemas vivientes como agentes

que detectan selectivamente en el medio ambiente perturbaciones físicas o señales procedentes de otros sistemas, las cuales interpretan generando mundos de significación que se expresan como funciones y tareas a ejecutar en un entorno determinado.

En consecuencia, la noción de información no se circunscribe al dominio de lo epistemológico, sino que se refiere a una realidad ontológica, es decir, se refiere a la actividad intrínseca de los sistemas tendiente a la actualización de un potencial. La actividad autorganizadora de la materia-energía opera de acuerdo con procesos físicos —termodinámicos y cuánticos— que incluyen como hecho real la interpretación de perturbaciones físicas (señales informativas) o factores que convergen contingentemente en un momento y lugar determinados, que orientan la adopción de constricciones internas y la elección de acciones a implementar sobre el entorno. Entender el potencial evolutivo, de acuerdo con la termodinámica de sistemas abiertos lejos del equilibrio y a la mecánica cuántica, conduce a incorporar la historicidad, sin violar ninguna ley física, de manera que las interacciones establecidas en el devenir histórico aparecen como un factor decisivo en la actualización de las formas existentes. Dicho de otro modo, reconocer que el universo, al actuar bajo las mismas leyes, hubiera podido ser diferente al que conocemos y en el que vivimos. Según Kauffman (2000, 2008) la información es la propagación de la organización o la actualización de la forma cuando se colocan impedimentos o restricciones a una materia amorfa e isotrópica en expansión. De todas las formas imaginables existe un número muy reducido correspondiente a los estados preferidos de Zurek, las cuales definen a aquellas que en efecto son realmente posibles y accesibles en un momento determinado de la historia de la vida. El conjunto de formas alcanzables en una generación tiende a crecer con el aumento de la diversidad de formas realmente existentes. Es decir, el potencial informativo se incrementa a lo largo de la evolución.

Desde la mirada de los físicos, sería deseable poder estimar parámetros estadísticos confiables de los estados característicos de los sistemas adaptativos, aunque esto supondría aislarlos idealmente de perturbaciones externas para poder definir con precisión las condiciones iniciales y el espacio de todas las alternativas o permutaciones realmente existentes. Sin embargo, como explica Kauffman (2008), es imposible hacer con antelación un listado de todas las maneras en que, por ejemplo, una misma secuencia de ADN o un mismo órgano puedan ser utilizados en una población de organismos, ya que depende de las circunstancias medioambientales en que estén expuestos. Por esta razón, desde la biología se asume que es imposible anticipar el valor que asumirían ciertos parámetros medibles dado que en la interacción de los sistemas adaptativos con el medio local se generan modificaciones impredecibles, justamente para mantener el encaje funcional entre el sistema viviente y el medio ambiente. En este

sentido, un marco de interpretación semiótico mostraría una congruencia entre física y biología, en la medida que la física, sin renunciar a la vigencia de sus leyes, se acomoda a una explicación histórica donde la contingencia debida a la confluencia espacio-temporal de una gran cantidad de factores tanto internos como externos, define el curso impredecible tanto de sistemas abiertos lejos del equilibrio como de los sistemas cuánticos. Las leyes físicas definen el ámbito de lo posible, y la contingencia histórica, sin violar ninguna de las leyes físicas, explica el mundo de las formas actualizadas (manifiestas en el mundo real) que sin embargo no son sino una ínfima fracción dentro de los muchos mundos posibles. Sotolongo y Delgado (2006), Ulanowicz (2009a), Gabora, et al. (2013) independientemente justifican la prevalencia de la semiosis sobre la causalidad física cuando la combinatoria de posibilidades futuras realmente accesibles sobrepasa la capacidad de las leyes universales para determinar los resultados. En este sentido, la explicación física (termodinámica y cuántica) no entra en conflicto radical con la explicación histórica y contingente adoptada previamente por el darwinismo. Las leyes universales son necesarias, pero las contingencias históricas en realidad tejen la trama de la vida. En otras palabras, tanto los sistemas físicos como los vivientes poseen un potencial inconmensurable para cambiar de formas diversas, y el cambio que en efecto tenga lugar depende del contexto de interacciones. Esto es, existe una complementariedad entre la potencialidad y la dependencia del contexto medioambiental, puesto que la actualización de este potencial depende de la interacción entre los sistemas y su medio circundante. La semiosis explicaría cómo esta transición está asociada a la interpretación de las perturbaciones físicas por parte de los sistemas interactuantes, como señales informativas, es decir, conducentes a la definición de arreglos estructurales internos y de las acciones que éstos proyectan al exterior.

Para terminar, quisiera decir que hoy en día la ciencia parece estar muy cerca de aceptar instancias de interpretación efectuada por agentes de medición interna en diferentes escalas de organización de la naturaleza, incluyendo niveles celulares y subcelulares como virus, priones y otras entidades macromoleculares. En el terreno filosófico y de mayor interés para los interesados en una filosofía natural, estamos comenzando a caer en cuenta de la existencia de unos principios generales, que aunque descubiertos en los seres vivos, operan también a escala del universo en su conjunto ¹⁷. Se trata del reconocimiento explícito de una analogía profunda entre lo físico y lo biológico, que sin duda tendrá consecuencias profundas en nuestra percepción y modo de actuar en el mundo del cual hacemos parte.

RECONOCIMIENTO

A mi querido profesor y amigo José Luis Villaveces, la primera persona a quien oí hablar con entusiasmo de demonios de Maxwell, funciones de onda, partículas en una caja, spines, gatos de Schrödinger, átomos de Böhr, modelos de bolas y palitos, además de incontables y motivantes debates sostenidos en el Grupo Interdisciplinar de Ciencia Teórica en la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (ACCEFEN) de 1991 a 1995. Este trabajo es el texto completo y revisado de la conferencia presentada el 8 de agosto de 2015 en la ACCEFEN en homenaje al profesor José Luis Villaveces y presentado en el Primer Congreso Internacional CEDAR V: "Evolución Biológica y Cultural", ciudad de Xalapa, Veracruz, México, septiembre de 2015, auspiciado por la Universidad Autónoma Metropolitana, organizado por el doctor Jorge Martínez Contreras.

NOTAS

- 1 "To those who look at climate and the physical conditions of life as the all-important elements of distribution, these facts ought to cause surprise, as climate and height or depth graduate away insensibly. But when we bear in mind that almost every species, even in its metropolis, would increase immensely in numbers, were it not for other competing species; that nearly all either prey on or serve as prey for others; in short, that each organic being is either directly or indirectly related in the most important manner to other organic beings, we must see that the range of the inhabitants of any country by no means exclusively depends on insensibly changing physical conditions, but in large part on the presence of other species, on which it depends, or by which it is destroyed, or with which it comes into competition; and as these species are already defined objects (however they may have become so), not blending one into another by insensible gradations, the range of any one species, depending as it does on the range of others, will tend to be sharply defined" (Darwin, 1859, pp. 155).
- 2 A lo largo del trabajo el lector caerá en cuenta que el termino IGUS, derivado de la termodinámica y la teoría de la información, puede con toda propiedad, como se irá argumentando, referirse a "sistemas de interpretación de Peirce", "sistemas vivos", "agentes de medición", "observadores", etc.
- 3 "Living matter, while not eluding the 'laws of physics' as established up to date, is likely to involve 'other laws of physics' It is, in my opinion, nothing else than the principle of quantum theory over again".
- 4 El concepto de espacio de Hilbert es una generalización del espacio euclídeo, la cual permite que nociones tales como ángulo entre vectores, ortogonalidad de vectores, teorema de Pitágoras, proyección ortogonal, distancia entre vectores y convergencia de una sucesión, aplicables a espacios de dimensión dos y tres, se extiendan a espacios de dimensión arbitraria, incluyendo espacios de dimensión infinita. Formalmente, se define como un espacio con producto interior que es completo con respecto a la norma vectorial definida por el producto interior. Un estado físico α en un instante de tiempo t viene descrito por un vector unitario de un espacio de Hilbert complejo. Dicho vector se denomina vector estado o ket, y se denota $|\alpha(t)\rangle$.

5

$$\hat{H}|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \frac{\hat{p}^2}{2m} |\psi(t)\rangle + V(\hat{r}, t) |\psi(t)\rangle$$

Donde i : es la unidad imaginaria; \hbar : es la constante de Planck normalizada ($\hbar/2\pi$); \hat{H} : es el hamiltoniano, dependiente del tiempo, los observables corresponden a la energía total del sistema; \hat{r} : es el observable posición; \hat{p} : es el observable impulso. V : es la energía potencial.

- 6 Un estado puro es un ensamble de sistemas cuánticos que puede ser descrito por un vector de estado único. Mientras que en un estado mixto, varios vectores de estado, no necesariamente ortogonales entre sí, son tomados como base. Un estado puro asociado a un sistema físico se representa por un vector unitario del espacio de Hilbert.
- 7 "Life is a system that uses internal quantum measurement to capture low-entropy states that sustain the state of the system against thermodynamic decay" (McFadden, 2000).

- 8 “When we come close to the limits of measurement (either by approaching the speed of light or the values of the Planck’s quantum), the relational effects become significant and the objectivity of world’s pattern melts down. Objective world can be formed by co-existing activities of IGUS systems. There is no ‘objective’ quantum reduction, but instead there is a redundant reduction based on the same fitting pattern that generates the observed objective picture. This reduction enforces classicality by imposing an effective ban on the vast majority of the Hilbert space via eliminating “Schrödinger cat states” (Zurek, 2003).
- 9 Epimutación: cambio heredable en la expresión génica que no afecta la secuencia de bases en el ADN. Las epimutaciones moleculares más estudiadas son las modificaciones en el ADN por metilación de algunas bases nitrogenadas y por modificaciones químicas en las proteínas histonas que envuelven al ADN dando lugar a la cromatina. Jablonka y Lamb (1998, 2006) sostienen que la herencia epigenética fundamenta el modelo neolamarckiano de evolución.
- 10 Hepi: denota el espacio de los estados QL del epigenoma celular que representan la información estadística de todos los cambios fenotípicos que pueden ser observados. Henv: denota el espacio de los estados QL del medio ambiente. Hepi⊗Henv: producto tensorial que denota el estado del sistema compuesto.

11

$$\gamma \frac{\rho_{epi}}{dt} = -i[H, \rho_{epi}(t)] + W \rho_{epi}(t)$$

Ecuación de Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad, aproximación markoviana de la dinámica del estado de S interactuante con el E. Donde H es el Hamiltoniano que describe la dinámica interna del estado epigenético de una célula aislada. W es el operador que describe la interacción de S con el E. Este operador está determinado por las propiedades del E, incluyendo el estado inicial del E (una constante con dimensiones de tiempo), y que determina las escalas temporales de evolución. Se ha eliminado la constante de Planck por cuanto no se están describiendo procesos físicos reales al interior de la célula.

- 12 “The probability wave of Böhr, Kramers, Slater (...) was a quantitative version of the old concept of “potentia” in Aristotelian philosophy. It introduced something standing in the middle between the idea of an event and the actual event, a strange kind of physical reality just in the middle between possibility and reality” (Heisenberg, 2007).
- 13 “Complexity is the property of a real world system that is manifest in the inability of any one formalism being adequate to capture all its properties. It requires that we find distinctly different ways of interacting with systems. Distinctly different in the sense that when we make successful models, the formal systems needed to describe each distinct aspects are NOT derivable from each other”.
- 14 “A living organism is a system. And entanglement, non-locality, non-separability, superposition, whatever these concepts may mean in biology, may present themselves both at each specific level of organization and in the interactions between levels of organization” (Longo y Montévil, 2011).
- 15 “One might perhaps call it an objective tendency or possibility, a ‘potentia’ in the sense of Aristotelian philosophy. In fact, I believe that the language actually used by physicists when they speak about atomic events produces in their minds similar notions as the concept ‘potentia.’ So the physicists have

gradually become accustomed to considering the electronic orbits, etc., not as reality but rather as a kind of 'potentia'" (Heisenberg, 2007, p 154-155).

- 16 "Because developmental mechanisms exhibit, variously, nonlinear, plastic and self-organizational properties, evolutionary transitions can be 'saltational' (i.e., phenotypically abrupt), rapid, and influenced by environmental change in a direct (i.e., Lamarckian) fashion and not just as a consequence of selection of marginally favorable variants" (Newman 2009).
- 17 "The evident fact that organisms make measurements does not mean that they operate on the basis of a principle different from that controlling the time development of the universe; it means that the universe operates on the basis of a principle that is expressed in a more evident way in the realm of biological organisms" (Conrad, 2001).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, E. (2000), "From external to internal measurement: A form theory approach to evolution", *Biosystems* 57 (2): 49-62.
- Andrade, E. (2003), *Los demonios de Darwin. Semiótica y termodinámica de la evolución biológica*. Bogotá: Unibiblos, 2003.
- Andrade, E. (2004), "On Maxwell's demons and the origin of evolutionary variations: an internalist perspective", *Acta Biotheoretica* 52: 17-40.
- Andrade (2009a), "Darwin o el falso conflicto entre la teoría de la selección natural y la hipótesis de la pangénesis", *Acta Biol. Colomb.* 14 S: 63-76.
- Andrade, E. (2009b), *La ontogenia del pensamiento evolutivo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Colección Obra Selecta.
- Andrade, E. (2014a), "Integration of thermodynamic, quantum and hierarchical theories of information within the context of Peircean semiosis", *BioSystems* 120: 10-20.
- Andrade, E. (2014b), "La vigencia de la metafísica evolucionista de Peirce", *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia* XIV, 28: 83-121.
- Anway, Matthew D., Andrea S. Cupp, Mehmet Uzumcu, and Michael K. Skinner. (2005), "Epigenetic transgenerational actions of endocrine disruptors and male fertility", *Science* 308: 1466-1469.
- Arai, J., Li, S., Hartley, D.M., & L.A. Feigl (2009), "Transgenerational rescue of a genetic defect in long-term potentiation and memory formation by juvenile enrichment", *J. Neurosci.* 29: 1496-1502.
- Asano, M., Basieva, I., Khrennikov, A., Ohya, M., Tanaka, Y., & Yamato, I (2013), "Unifying cellular (neo)Darwinism and (neo)Lamarckism: A model of epigenetic evolution based on theory of open quantum systems", *Systems and Synthetic Biology*. <http://www.researchgate.net/publication/257719156> DOI: 10.1007/s11693-013-9109-3
- Balbin, A. & Andrade, L.E. (2004), "Protein folding and evolution are driven by the Maxwell demon activity of proteins", *Acta Biotheoretica* 52 (3): 173-200. www.kluweronline.com/issn/0001-5342/contents
- Bateson, G. (1976), *Pasos hacia una ecología de la mente*. BsAs.: Carlos Lohlé.
- Binder, P & Danchin, A. (2011), "Life's demons: information and order in biology", *EMBO Reports* 12, 6: 495-499.
- Blackmore, S. (1995), *The Meme Machine*. Oxford: Oxford University Press.
- Bordonaro, M. & Ogryzko, V. (2013), "Quantum biology at the cellular level. Elements of the research program," *arXiv:1304.0683 [q-bio.OT]*
- Bowler, P.J. (1983), *The Eclipse of Darwinism: Anti-Darwinian Evolution Theories in the Decades Around 1910*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Brooks, D. & Wiley, E. O. (1988), *Evolution as Entropy*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cairns, J., Overbauch, J., Miller, S. (1988), "The origin of mutants", *Nature* 335: 142-145.
- Campbell, J. (2010), "Quantum Darwinism as a Darwinian process", arxiv.org/pdf/1001.0745
- Conrad, M. (2001), "Unity of measurement and motion", *BioSystems* 60: 23-38.
- Chaisson, E.J. (2001), *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Darwin, D. (1859), *The Origin of Species by means of Natural selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. 1997. ElecBook London edition based on the First Edition published by John Murray, London.
- Darwin C. (1868), *Animals and Plants under Domestication*. London: John Murray.

- Davies, P.C.W. (2004), "Does quantum mechanics play a non-trivial role in life?", *BioSystems* 78: 69-79.
- Dawkins, R. (1976), *The Selfish Gene*. Oxford: Oxford University Press.
- Dennet, D. (1995), *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York: Simon and Schuster; London: Allen Lane.
- Engel, G.S., Calhoun, T.R., Read, E.L., Ahn, T.K., Mancal T, Cheng, Y.C., Blankenship, R.E., Fleming, G.R. (2007), "Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems", *Nature* 446, 782-786.
- Everett, H. (1957), "'Relative state' formulation of quantum mechanics", *Reviews of Modern Physics* 29: 454-462.
- Foster, P.L., Cairns, J., (1992), "Mechanisms of directed mutation", *Genetics* 131: 783-789.
- Fox Keller, E. (2000), *Lenguaje y vida. Metáforas de la biología en el siglo XX*. BsAs: Manantial.
- Gabora, L., Scott, E.O. & Kauffman, S. (2013), "A quantum model of exaptation: Incorporating potentiality into evolutionary theory", *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 113: 108 -116.
- Giere, R. (1999), *Science Without Laws*. Chicago: The University of Chicago Press
- Gould, S.J. (2002), *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Hall, B.G. (1991), "Adaptive evolution that requires multiple spontaneous mutations: mutations involving base substitutions", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88: 5882-5886
- Hall B.G. (1992), "Selection-induced mutations occur in yeast", *Proc.Nac. Acad.USA* 89: 4300-4303
- Hall, B.G. (1997), "Spontaneous point mutations that occur more often when advantageous than when neutral", *Genetics* 126: 4-16
- Ho Mae-Wan, (1998), *The Rainbow and the Worm, the Physics of Organisms*. Singapore/River Edge, NJ: World Scientific.
- Igamberdiev, A.U. (2003), "Living systems are dynamically stable by computing themselves at the quantum level", *Entropy* 5: 76-87.
- Igamberdiev, A.U. (2004), "Quantum computation, non-demolition measurements, and reflective control in living systems", *BioSystems* 77: 47-56.
- Igamberdiev, A.U. (2005), "The computation power of living systems is maintained by decoherence-free internal quantum states," in *FIS Third Conference on the Foundations of Information Science*, Paris, 4-7 July
<http://www.mdpi.org/fis2005/>
- Igamberdiev, A.U. (2008), "Objective patterns in the evolving network of non-equivalent observers", *BioSystems* 92: 122-131.
- Jablonka, E. and M.J. Lamb (1998), "Epigenetic inheritance in evolution", *Journal of Evolutionary Biology* 11: 159-183.
- Jablonka, E. and M.J. Lamb. (2006), *Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*. Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book. The MIT Press.
- Heisenberg, W. (2007), *Physics and Philosophy*, Harper Perennial Modern Classics edition, cited by E. Frazer on his blog "Heisenberg on act and potency".
- Kauffman, S. (1993), *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (2000), *Investigations*. NY: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (2008), *Reinventing the Sacred: A New View of Science, Reason, and Religion*. NY: Oxford University Press.

- Kitto, K. (2014), "A contextualised general systems theory", *Systems* 2: 541-565; doi: 10.3390/systems2040541
- Longo, G. & Montévil, M. (2011), "From physics to biology by extending criticality and symmetry breakings", *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 106: 340-347.
- Luria, S.E. & Delbruck, M. (1943), "Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance", *Genetics* 28: 491-511.
- McFadden, J. & Al-Khalili, J. (1999), "A quantum mechanical model of adaptive mutation", *BioSystems* 50: 203-211.
- McFadden, J. (2000), *Quantum Evolution: Life in the Multiverse*. NY: Harper Collins.
- Matsuno, K. (1989), "Internal measurement", in *Protobiology: Physical Basis of Biology*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Matsuno, K. (2006), "Forming and maintaining a heat engine for quantum biology", *BioSystems* 85 (1): 23-29.
- Matsuno, K. (1996), "Internalist stance and the physics of information", *BioSystems* 38 (2-3): 111-118.
- Maxwell, J.C. (1999), *Escritos científicos*. Barcelona: Círculo de Lectores.
- Mikulecky, D. (2001), "The emergence of complexity: science coming of age or science growing old?" *Computers & Chemistry* 25 (4): 341-348.
- Newman, S. (2009), *Evolution is not Mainly a Matter of Genes*. The 200th anniversary of Charles Darwin. NY: New York Medical College.
- Ogryzko, V. (1997), "A quantum-theoretical approach to the phenomenon of directed mutations in bacteria (hypothesis)", *Biosystems* 43:83-95.
- Ogryzko, V.V., (2009), "On two quantum approaches to adaptive mutations in bacteria", *NeuroQuantology* 7(4).
- Oyama, S. (2000), *The Ontogeny of Information. Developmental Systems and Evolution*. Durham: Duke University Press.
- Pattee, H. (1995), "Evolving self-reference: matter, symbols, and semantic closure", in Rocha, L. (ed.), *Communication and Cognition—Artificial Intelligence (special issue on self-reference in biological and cognitive systems)* 12(1-2): 9-27.
- Peirce, C. S. (1891), "La arquitectura de las teorías" (original en: *The Monist* I, pp. 161-76; incluido en: [CP 6. 7-34]) (trad. Marinés Bayas, <http://www.unav.es/gep/ArquitecturaTeorias.html>, 2004).
- Peirce, C.S. (1931-1958), *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, vols. 1-8. Harts-horne, C., Weiss, P., Burks, A.W. (eds.), Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1984), *Order out of Chaos. Man s New Dialogue With Nature*. NY: Bantam Books.
- Roederer, J.G. (2012), *The Role of Pragmatic Information in Quantum Mechanics and the Quantum-Classical Transition*, arXiv: 1108.0991v2 [quant-ph] 28 Jul 2012).
- Rosen, R. (2000), *Essays on Life Itself*. Complexity in ecological systems series. New York: Columbia University Press.
- Salthe, S. (2004), "The spontaneous origin of new levels in a scalar hierarchy", *Entropy* 6: 327-343.
- Salthe, S. (2010), "The development (and evolution) of the universe", *Foundations of Science* 15: 357-367.
- Schneider, E.D. & Kay, J.J. (1994), "Life as a manifestation of the second law of thermodynamics", *Mathematical and Computer Modelling* 19, 6-8: 25-48.
- Schneider, E.D. & Sagan, D. (2005), *Into the Cool. Energy Flow, Thermodynamics and Life*. Chicago: The University of Chicago Press.

- Schroedinger, E. (1944), *What Is Life?* Cambridge: Cambridge University Press.
- Shapiro, J.A. (2013), "How life changes itself: the read-write (rw) genome", *Physics of Life Reviews* 10(3): 287-323.
- Slack, J. (2002), "Conrad Hal Waddington, the last Renaissance biologist?", *Nature Reviews Genetics* 3: 889-895.
- Swenson, R. (1989), "Emergent attractors and the law of maximum entropy production: Foundations to a theory of general evolution", *Systems Research* 6: 187-197.
- Sollars V., Lu X, Xiao L., Wang X., Garnkel M.D., & Ruden, D. M. (2003), "Evidence for an epigenetic mechanism by which Hsp90 acts as a capacitor for morphological evolution", *Nature Genetics* 33: 70-74
- Sotolongo, P y Delgado, C.J. (2006), *La revolución contemporánea del saber y la complejidad social. Hacia unas ciencias sociales de nuevo tipo*. 1a ed. - Buenos Aires: Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales - CLACSO (Campus Virtual de CLACSO dirigida por Gabriela Amenta).
- Steele D.F., Jinks-Robertson S. (1992), "Examination of adaptive reversion in *S. cerevisiae*", *Genetics* 132:9-21.
- Tegmark, M. (1999), "The importance of quantum decoherence in brain processes", *Phys. Rev. E*. 14194-4206. arxiv.org/abs/quant-ph/9907009
- Thompson, W., Baron Kelvin. (1911), *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge University Press, Inglaterra. Citado en Fox Keller, E. 2000. *Lenguaje y Vida. Metáforas de la biología en el siglo XX*. BsAs: Manantial.
- Ulanowicz, E.E. (2009a), *A Third Window. Natural Life beyond Newton and Darwin*. West Conshohocken, Pennsylvania: Templeton Foundation Press.
- Ulanowicz R.E. (2009b), "Increasing entropy: heat death or perpetual harmonies?" *Des. Nat. Ecodyn.* 4(2):1-14.
- Waddington, C.H. (1957), *The Strategy of the Genes*. London: Geo Allen & Unwin.
- Waddington, C.H. (1961), "Genetic assimilation", *Advances Genetics* 10: 257-293.
- West-Eberhardt, M.J. (1989), "Phenotypic plasticity and the origins of diversity", *Annual Review of Ecological Systems* 20: 249-278.
- West-Eberhardt, M.J. (2003), *Developmental Plasticity and Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Zurek, W.H. (1991), "Decoherence and the transition from quantum to classical", *Phys. Today*, October: 36-44.
- Zurek, W.H. (1989a), "Algorithmic randomness and physical entropy," *Physical Review A* 40 (8): 4731-4751.
- Zurek, W.H. (1989b), "Thermodynamic cost of the computation, algorithmic complexity and the information metric", *Nature* 341: 119-124.
- Zurek, W.H. (2002), "Decoherence and the transition from quantum to classical—revisited", *Los Alamos Science* (27): 1-25.
- Zurek, W.H. (2003), "Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical", *Reviews of Modern Physics* 75: 715-775.
- Zurek, W.H. (2009), *Quantum Darwinism*. arXiv: 0903.5082v1 [quant-ph] 29 Mar 2009.
- Zwolak, M., Quan, H. T. & Zurek, W.H. (2009), "Quantum Darwinism in a mixed environment", *Phys. Rev. Lett.* 103,110402. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.110402>