

LOS SISTEMAS COMPLEJOS BIOLÓGICOS, SU DESARROLLO Y SU EVOLUCIÓN

Walter Cantero Morales

Caracterización de los sistemas complejos vivos

El paradigma ortodoxo clásico que rige la biología ha basado en múltiples ocasiones su metodología de estudio en planteamientos reduccionistas. Esto ha conllevado diversas consecuencias que impiden el entendimiento y el correcto estudio de las entidades y procesos biológicos. Estas conductas reduccionistas han llevado a atribuir un papel omnipotente al ADN, cuando en realidad éste podría ser mejor definido como una molécula pasiva y de almacenamiento de información. Se han empleado métodos idénticos a los utilizados para el estudio de materias inertes debido a la obviación de la propia ontología de los sistemas vivos o biológicos, y se han explicado éstos como si de sistemas complicados se tratasen, lo cual impide su comprensión y destapa falsas interpretaciones. La realidad es que las entidades biológicas son en realidad sistemas complejos en los cuales el total no es igual que la suma de sus partes.

Los genes no determinan de forma lineal los caracteres, sino que interactúan entre sí y con sus productos por lo que los caracteres son un producto multidimensional. Ya no podemos afirmar que la función génica sea independiente de las influencias ambientales, sino que la expresión génica varía según lo hagan las condiciones del ambiente. Negamos también el carácter estable del genoma, afirmamos que éstos son dinámicos y destacan por su plasticidad. Por último debemos aceptar que aparte de ser heredados de forma vertical, también pueden ser transmitidos horizontalmente entre diferentes especies.

Los modelos de organización biológica difieren de los inertes en diversas cualidades. La organización biológica posee autoreferencia, lo vivo posee contingencia, las relaciones entre los constituyentes de lo vivo son del tipo 'todo con todo' y no del tipo 'uno con uno'. Todo aquello que consideremos vivo debe mantener cualidades antientrópicas, lo cual es debido a su capacidad autocatalítica.

Los sistemas complejos vivos o biológicos debido a su ontología compleja poseen una serie de atributos o características que los diferencian de cualquier sistema simple o meramente complicado. Su todo es superior a la suma de sus partes. Se observa una emergencia, las propiedades del sistema son resultado de las conexiones de sus partes y difieren de las propiedades de sus partes. Las propiedades sistémicas, por tanto, son destruidas cuando el sistema es diseccionado en elementos aislados. Por tanto los sistemas complejos no son fragmentables y se caracterizan por ser irreducibles. Sus relaciones causa-efecto se encuentran ligadas a múltiples variables, es decir, un efecto puede no siempre tener una misma causa y una misma causa no tiene por qué dar lugar siempre a un mismo efecto. A su vez, los sistemas complejos no son computables y no los podemos fabricar de forma artificial.

Así, los sistemas biológicos vienen definidos por una serie de cualidades bien establecidas, su complejidad y organización a múltiples escalas y niveles, cada uno de ellos marcados por un conjunto de reglas propias, los hace diferentes de raíz frente a sistemas que no poseen este atributo. Además, se distinguen de otros sistemas complejos físicos no vivos en sus cualidades de adaptación, crecimiento y desarrollo, reproducción y evolución. Esto quiere decir que toda entidad biológica en su condición de sistema complejo vivo expresa una serie de características únicas y diferenciales. Toda entidad biológica proviene de otra parental más o menos semejante de la que desciende, y además es capaz de reproducirse para formar nueva descendencia. A su vez, los sistemas vivos son capaces de adaptarse a las variaciones que puedan desplazarlos de su equilibrio, y dan nuevos tipos de organismos que ven la luz a lo largo del tiempo mediante la evolución.

Al analizar la emergencia o comportamiento emergente en los sistemas biológicos somos capaces de resaltar una serie de propiedades que los hacen únicos, la principal de ellas es la vida, es decir, el estar o más bien ser vivos. Estas propiedades emergentes no se corresponden con ninguna de las de sus componentes. La emergencia por tanto es lo que las partes integrantes del sistema llevan a cabo juntas y que no harían al encontrarse separadas, es decir su comportamiento colectivo, y lo que un sistema hace en virtud a su relación con el ambiente y que no haría por sí mismo al desenmarcarlo de éste. Debido a la emergencia obtenemos los atributo previamente citados que definen a los sistemas biológicos, como son la autoorganización, el autoensamblaje, la autorreparación, y la autorreplicación o reproducción. La emergencia de los sistemas vivos depende de las conexiones entre sus partes integrantes, las cuales son dinámicas y fluidas, y dependen del momento y entorno, debido a ello podemos obtener entidades biológicas diferentes y diversas al presentar éstas conexiones y dinámica de conexión diferentes entre las partes que las forman.

Todo sistema biológico es además robusto por definición, esto quiere decir que son capaces de mantener su estado y función frente a perturbaciones tanto externas como internas, esto se desprende de su condición de adaptabilidad. Cuanto más complejo es un organismo más fina es la regulación de sus procesos, y por consiguiente más robustos son y mejor toleran los pequeños cambios. Los grandes cambios evolutivos precisan de cambios en las pautas de desarrollo, el cual es un proceso altamente regulado. La robustez ha de tener importantes implicaciones evolutivas ya que al ser capaz de amortiguar pequeños cambios, el proceso de evolución de un organismo debe venir mediado a través de cambios bruscos que impliquen una reorganización considerable, y no mediante pequeñas mutaciones azarosas y graduales, como tradicionalmente ha sido defendido. La complejidad viene emparentada con el surgimiento de comportamientos y propiedades emergentes, lo cual influye a su vez en la robustez al aparecer las propiedades que permiten al sistema organizarse desde dentro.

Todo sistema robusto es a su vez frágil. Si bien es robusto frente a incertidumbres comunes, frente a incertidumbres que puede afrontar debido a su diseño y capacidad de adaptación y frente a incertidumbres ante las que el sistema haya evolucionado, el sistema es frágil y puede producirse la muerte. Determinadas conexiones que conforman el sistema poseen un carácter esencial y si son perturbadas puede acaecer la disfunción y posible destrucción del sistema. Este es el caso de los genes esenciales que suelen constituir entre el 5 o el 10% de los genes totales de los

organismos vivos, o el núcleo metabólico celular. Cuando estos elementos son alterados y si el organismo no muere, puede producirse un cambio evolutivo de considerable magnitud y relevancia.

La robustez es esencial en procesos de desarrollo y se observa una canalización del mismo. Dentro de una misma especie el resultado morfológico final va a ser siempre el mismo gracias a esta canalización, y se puede llegar a él pese a variaciones entre los individuos. La robustez en los sistemas biológicos se debe a la existencia de redundancia tanto estructural como funcional, es decir unos elementos o interacciones pueden ser sustituidos en un momento dado por otros. La robustez es debida también a los fenómenos de autorregulación y autobalance de los procesos bioquímicos, apareciendo procesos del tipo feedback positivo y negativo entre los distintos elementos que disponen conexiones al relacionarse en una estructura de red. Influyen de manera determinante en la robustez los sistemas de prevención, reducción y corrección de errores. Éstos permiten reparar los productos defectivos o desecharlos, si no es posible su reparación o si poseen un carácter tóxico para el organismo, mediante métodos de eliminación o detoxificación.

Todo sistema biológico además de ser robusto y poseer una serie de propiedades emergentes que los caracterizan, es un sistema autopoyético. Esto implica la posesión de capacidad autoorganizativa y de autocatálisis espontáneas que aportan a los sistemas biológicos un orden antientrópico. Este orden es propio de los sistemas complejos vivos, deriva de su estructura interna como materia y se sirve de los procesos de feedback positivo y negativo que además aportan adaptabilidad al sistema. Este orden o patrón surge del propio sistema y es inherente a él, es una propiedad emergente, y no es impuesto por el entorno. El patrón alcanzado a nivel sistémico surge de la interacción de los elementos integrantes. Así, las interacciones sencillas y localmente establecidas entre estos elementos que no poseen información sistémica, proporcionan en su conjunto el patrón global del sistema.

De este modo podemos explicar un desarrollo generacionista o epigénico, en el cual mediante el uso de unas moléculas informacionales se crea un patrón de orden capaz de constituir un organismo complejo a partir de una masa informe. Y si bien el patrón es autoorganizado influye en él el contexto en el cual se sucede. La creación y mantenimiento de interacciones entre los distintos elementos depende del contexto y de la información local. Si eliminamos una fuente local de información no obtenemos el mismo orden final, y si variamos el contexto en el cual un elemento interacciona se pueden dar lugar a patrones de orden finales completamente diferentes.

Cuando el orden se crea sin líderes

Los sistemas complejos son capaces de la autoorganización sin líderes, es decir, entre los elementos que establecen las conexiones mediante las cuales se acaba dando un patrón de orden no hay un elemento más importante que otro. Cualquier patrón de orden alcanzable es válido por lo que no hay nada presupuesto o preexistente en un inicio. Debido a esto, un pequeño cambio a nivel local puede resultar en una amplia heterogeneidad que se traduce en grandes cambios o variaciones del patrón de orden finalmente alcanzado. Para la consolidación del orden, la formación del patrón se basa en la información más próxima que un elemento puede obtener, es decir, se consigue un

orden global mediante las interacciones locales y la información del ‘vecino más próximo’.

Este comportamiento de los sistemas es también observable en la actividad social en colonias o en los organismos que se desplazan masivamente y de forma colectiva. En ningún caso existe un líder, este comportamiento tan sólo se basa en la respuesta de un organismo en función de lo que realiza el organismo más cercano, y según se extrae información local el patrón es modificado. Se descentraliza la organización y mediante múltiples relaciones sencillas entre múltiples partes se crea un patrón de orden.

Consecuentemente se alcanza orden a partir del desorden y de una estructura sin jerarquía alguna. Esto tiene importantísimas implicaciones filosóficas que deberían ser examinadas con más calma. Partiendo de que las sociedades son sistemas complejos, se podría por tanto afirmar que los líderes son innecesarios, y que a partir de la anarquía podría ser extraído un patrón de orden final. Esto exigiría a su vez un giro en la racionalidad humana que quizás pueda venir favorecido por el entendimiento de las implicaciones que los sistemas complejos conllevan y su correcta interpretación. El giro en la racionalidad es de vital importancia ya que en las relaciones que componen una sociedad humana la racionalidad es el principal motor direccional o timón que las reconduce. Bajo una racionalidad que reconduzca el sistema impidiendo el correcto funcionamiento de algún módulo de su red este se vendría abajo, y quizás sea esto lo observable a día de hoy. Sin lugar a dudas esto supone una de las mayores amenazas a las que la humanidad se enfrenta.

¿Cuál sería el patrón de orden emergente de una sociedad humana sin líder alguno? ¿Es la propia racionalidad humana actual el verdadero escalón limitante que impide que este orden pueda ser alcanzado? Si se tratase de autoorganizar una sociedad humana desde una racionalidad de relaciones competitivas como la hoy en día vigente, el orden final sería la propia deformación de la ontología de los sistemas y la consecuente aparición de líderes y clases poderosas debido a que las relaciones competitivas establecidas entre las diferentes partes irán en detrimento de la mayoría de las partes integrantes y favorecerían el beneficio único y potencial de una minoría de ellas. Si por el contrario se tratara de autoorganizar una sociedad regida por una racionalidad cooperativa, el resultado sería el esperado, ya que se permitiría la correcta interrelación de todos los elementos de la red sin que el patrón del orden fuese modificado a favor de un solo tipo de relaciones. El cambio de racionalidad humana es por tanto una necesidad de carácter obligado para el futuro si se pretende que la humanidad persista y su sociedad no se desplome.

Así se demuestra que la naturaleza no se rige por principios de competencia, y seguramente gracias a ello hoy en día la vida sigue siendo posible. Si no fuese de este modo la red global de los sistemas biológicos se habría desmoronado hace tiempo. Sin embargo esto es inaceptable desde el planteamiento racional actual ya que se justifica el propio comportamiento egoísta y competitivo de la naturaleza como una característica básica constitutiva de su ontología. Los planteamientos propuestos por la teoría de redes en cuanto a la creación de orden sin líder no son fácilmente asumibles ni aceptables por el paradigma científico actual al encontrarse regido por una racionalidad opuesta a ello, y así son erróneamente interpretados. Se precisa por tanto un cambio en el paradigma

actual, pero este cambio es gravemente dificultado al verse anclado el paradigma vigente en lo más profundo de las raíces de la racionalidad humana.

Hemos de entender las entidades biológicas como sistemas complejos vivos compuestos por una serie de elementos integrantes que se encuentran altamente relacionados unos con otros estableciendo un sistema de conexión en red. Dichas relaciones no deben ser entendidas ni como competencias ni cooperaciones, ya que estos son términos subjetivos definidos por la propia racionalidad humana, sino como simples interconexiones que favorecen y promueven el correcto funcionamiento global de todos los módulos obteniéndose así unas propiedades finales no reducibles a las propiedades iniciales de las partes integrantes. Por tanto, el carácter principal del comportamiento del sistema es de tipo integrador. Este carácter integrador que permite el funcionamiento integrado de todas las partes constitutivas para conseguir el orden y la estabilidad final del sistema, posee de hecho un significado contrario al que establecemos por la denominación de carácter competitivo, el cual promueve relaciones antagónicas o de rivalidad entre las partes, este tipo de relaciones son causantes de la pérdida de función o actividad de algunos de los de los módulos o elementos modulares constitutivos, impidiendo así su correcta integración y produciendo la pérdida de estabilidad u orden sistémico.

Cuando muchos constituyen la unidad y cuando el ambiente marca el fenotipo

El orden final que adquiere cualquier entidad biológica ha de ser un consorcio en el que varias de estas entidades se vean integradas en convivencia para resultar en un organismo capacitado para la vida. Es prácticamente imposible encontrar un sistema biológico que actúe aislado del resto de sistemas vivos, y en el caso de sistemas biológicos de gran complejidad como los metazoos, es imposible concebirlos si no es como una unidad sistémica formada por la inclusión e integración de otras de menor complejidad. La integración de varios sistemas biológicos dan lugar a un nuevo sistema ontológicamente diferente y de mayor complejidad que no puede existir o vivir si no es en presencia de sus entidades constitutivas. Un organismo no es aislado sino una suma de organismos que mediante la integración en consorcio alcanzan un nivel superior de complejidad en un nuevo organismo de naturaleza completamente diferente a la de sus partes integrantes.

Para poner un ejemplo cercano podemos hablar de nosotros mismos. Si observamos aisladas todas y cada una de las células que conforman nuestro ser, tan sólo el 10% son células humanas en sentido estricto, el otro 90% son células procariontes, es decir bacterias. Esto quiere decir que si aislamos el 10% humano destruimos nuestra ontología, el resto del 90% es imprescindible para la formación y función de nuestro ser, es decir, el ser humano al igual que cualquier otro organismo no es sino una suma de éstos, y es únicamente esta suma la que permite su existencia.

No sólo nuestro organismo es un producto unitario de la suma de otros muchos, cada una de nuestras células humanas ya lo es en sí misma. Cada una de ellas está constituida por diversos orgánulos que no son más que arcaicas bacterias integradas en algún momento de la historia de la vida en el interior de las células eucariotas. El propio genoma no es sino resultado de una suma de genes derivados de la integración de genes

bacterianos y víricos, y de las reorganizaciones producidas a lo largo de la historia de la vida en los genomas de las células eucariontes.

Toda morfología final de un sistema biológico o entidad viva depende estrechamente y es resultado de un proceso de desarrollo que la acabe generando. En relación a esto, debe tenerse además en cuenta que la regulación tanto por parte del ambiente como por parte de otros sistemas vivos es imprescindible para dicha morfología final. Sin flora intestinal no es posible el desarrollo correcto del intestino ya que la presencia de ésta es indispensable para que el proceso de angiogénesis tenga inicio, gracias a este proceso es posible la generación de una extensa red de capilares que permita la absorción de nutrientes. Son incontables los procesos de carácter obligado que permiten a los organismos un correcto desarrollo y funcionamiento de sus órganos, de sí mismos y de su progenie, y que se llevan a cabo gracias y sólo en presencia de una entidad biológica de ontología diferente pero que al ser parte indispensable es también un elemento de la propia ontología del nuevo ser vivo.

El consorcio no sólo puede verse constituido por bacterias, protozoos, algas u hongos, junto a las células eucariotas de los diversos tejidos de la entidad final morfológica y funcional, los virus constituyen una parte vital de estos procesos de asociaciones e integraciones en consorcio. Este ser en consorcio de todos los seres vivos puede llegar a implicar diferencias incluso en el comportamiento de los mismos, propiedad que emerge de la relación entre *Apis mellifera* y un *picornavirus* es un claro ejemplo. Los virus junto al resto de unidades integrantes han de ser todas entendidas en su conjunto como unidades constitutivas vitales y por tanto como parte del organismo que forman y no como parte externa a él. Los virus han permitido procesos de vital importancia para los sistemas complejos vivos tanto para su formación como para su correcto funcionamiento y supervivencia. A ellos se debe la existencia del fenómeno de la placentación en mamíferos, y sus genes fueron imprescindibles en el surgimiento de la fotosíntesis, ya que estos forman parte integral de los fotosistemas presentes en los cloroplastos.

Las relaciones en consorcio entre entidades biológicas diferentes pueden además presentar efectos poblacionales, como es el caso de *wolbachia* en los insectos. Según encontremos a esta bacteria asociada o no en el interior del insecto, la sexualidad de la progenie varía tras la reproducción e incluso puede llegar a obtenerse o no descendencia.

Así los elementos que forman parte integral de todos los consorcios, debido a una mentalidad y quehacer científico de carácter reduccionista, pasan a formar parte de lo que me gusta denominar como “*amigos de la vida, enemigos de la ciencia*”, ya que sin ellos nosotros no seríamos iguales ni posiblemente pudiésemos existir tal cual lo hacemos, ni siquiera la vida tal cual la conocemos sería la misma porque son imprescindibles y de vital importancia al ser los autores de algunas de las principales relaciones dentro de los sistemas complejos vivos, y que en cambio la ciencia se encarga de tachar vehementemente sin dudarlo de patógenos, parásitos, malignos, basura, egoístas, etc...Y es que desgraciadamente, ya no hay entidad biológica que se salve de estar englobada bajo la terminación previamente citada, desde el ser humano, violento y egoísta por naturaleza, pasando por hongos, protozoos, bacterias y virus, hasta alcanzar ya lo que tan sólo es bioquímico como secuencias de material genético y proteínas, como los temidos priones. Quizás la ciencia no sea capaz de ver que un elemento con un

potencial creador de diversidad y de regulación de tal magnitud o un elemento que ocupa un lugar particular en una red de relaciones, al ser alterado y desplazado de su equilibrio pueda adquirir un potencial destructor y desestabilizador proporcional, y así cualquier gen esencial para el desarrollo de un ser vivo pluricelular, si su expresión se ve desregulada, pueda dar un proceso de carcinogénesis. Y si este hecho ya es tan simplistamente crucificado por la ciencia, es fácilmente imaginable los adjetivos con los que serán descritos otras secuencias génicas como los “egoístas” elementos móviles, cuando en realidad están demostrando ser uno de los mecanismos imprescindibles para entender la evolución, debido a su capacidad para dar lugar a grandes remodelaciones génómicas, procesos de neo-regulación de la expresión génica, formación de secuencias repetidas, participación en procesos de coopción de genes y evolución intercalar, etc, además cabe recordar que son justamente este tipo de cambios, y no los de menor carácter, los capaces de dar lugar a evolución debido a la robustez de los sistemas complejos vivos.

Muchos de estos peligrosos parásitos son en realidad imprescindibles para la nutrición del organismo en el que se encuentran, así como método de defensa ante verdaderos patógenos externos no integrantes del sistema, y no podemos olvidar su papel en el desarrollo de la función del sistema inmune. Al ser parte constitutiva del organismo, éste en condiciones normales, los reconoce como propios y no actúa contra ellos. Desgraciadamente el reduccionismo científico trae graves consecuencias, como la muerte de bebés debido al suministro único de agua estéril, el aumento de alergias y enfermedades autoinmunes debido a una higiene desmedida que va en contra de los propios elementos constitutivos de nuestro ser, y que decir de las investigaciones que actúan sin tener en cuenta que los retrovirus endógenos son unidad constitutiva de los genomas...

El desarrollo, por tanto, depende del contexto tanto biótico como del abiótico. Durante el proceso de desarrollo y consecuentemente obtención de una morfología específica y concreta, el ambiente actúa de forma instructiva sobre un genoma reactivo. De este modo se dan lugar a polifenismos, siendo estos las apariciones de fenotipos diferentes, cualitativamente distintos, partiendo de un genoma idéntico dependiendo de los factores ambientales en los que se desarrollen.

Estos fenómenos de desarrollo diferencial se encuentran estrechamente ligados y relacionados con la capacidad adaptativa propia de los sistemas complejos vivos. Pueden venir mediados por cambios abióticos en el medio, es el caso de las fluctuaciones del agua, la humedad, la luz, la temperatura, consecuentemente también se crean polifenismos estacionales, así como por cambios bióticos, es el caso de fluctuaciones en la densidad de la población, polifenismos inducidos por la presencia de depredadores, la diferenciación en castas debida a diferencias nutricionales, etc. Estos cambios fenotípicos han de deberse a cambios en la regulación y expresión génica de la red encargada del control del proceso de desarrollo de una morfología concreta. Esto tiene evidentes implicaciones evolutivas, ya que podemos afirmar del mismo modo que para que se produzca un cambio a nivel macroevolutivo y la aparición de una entidad biológica nueva diferente al resto y con una morfología que la caracteriza, es imprescindible que se produzca un gran cambio en las redes de regulación de la expresión génica del proceso de desarrollo previamente existentes.

Son destacables del resto de polifenismos morfológicos aquellos que son heredables, como el que se produce en *Daphnia* debido a la presión por la existencia de depredadores como la larva del díptero *Chaoborus*, y el nuevo fenotipo se transmite a la descendencia sin más cambios en el genoma que señales epigenéticas. Son destacables también los polifenismos en la determinación sexual, que a parte de poder deberse a factores climáticos como en algunos reptiles, también pueden deberse a cambios en la estructura social, por ejemplo, debido a la ausencia de un macho en el harén, ésto sucede en distintos peces, o al lugar en el que se asiente la larva siendo el sustrato el propio suelo o una hembra, esto sucede en un integrante del filo de los equiúridos, *Bonellia*; en gerbos de Mongolia el sexo puede variar según la posición del feto en el útero y según su emplazamiento entre el resto de embriones. No debemos olvidar los polifenismos comportamentales, en los cuales la variación es del comportamiento de la especie y no de su morfología, esto sucede en arañas que varían la estructuras de sus redes según el tipo de presa que encuentran en un determinado ambiente o entorno.

Cuando los sistemas biológicos evolucionan

Recapitulando lo anteriormente dicho, los cambios evolutivos conllevan un cambio capaz de superar la robustez de los sistemas complejos, éste debe por tanto poseer una magnitud considerable y afectar a algún modulo esencial para el funcionamiento de la red. Además, ya que cualquier morfología es dependiente de un proceso de morfogénesis, para dar lugar a un cambio evolutivo han de darse variaciones en los procesos de desarrollo. Los procesos mutacionales necesarios para el cambio evolutivo no son pequeñas mutaciones puntuales, azarosas y acumuladas gradualmente, y se asemejan en mayor medida con los fenómenos finales obtenidos tras la transposición y retrotransposición de elementos móviles genómicos, y entre ello algunos de los de mayor relevancia son retrovirus endógenos.

Por mucho que se pretenda mediante estudios poblacionales, estos serán incapaces de resolver el enigma del proceso evolutivo ya que la evolución no son cambios en las frecuencias génicas sino complejos cambios morfofisiológicos. Estos cambios en los *bauplanes* implican necesariamente cambios en el desarrollo. Una vez adquirido un nuevo orden morfofisiológico final este ha de fijarse genéticamente para poder ser transmitido y heredable a lo largo de la historia.

Cuando los sistemas biológicos evolucionan lo hacen en momentos históricos puntuales y de forma brusca. Tras haberse fijado el nuevo patrón este perdura estable a lo largo de la historia y varia únicamente en función de su capacidad adaptativa. La adaptación implica cambios dentro de un mismo orden, la evolución implica la transformación de un orden previamente existente en otro orden de ontología diferente, por lo tanto no debería en ningún caso ser confundido el fenómeno de la adaptación de las especies con el de la evolución de éstas. Se puede además añadir que cuando los sistemas biológicos evolucionan lo hacen después de periodos de alto estrés ambiental.

La generación del patrón morfofisiológico y su estructura modular está directamente relacionada con la plasticidad fenotípica, esto es la formación de polifenismos y diversidad en grupos con un mismo genotipo. Depende también de una plasticidad genómica y epigenética, mediante la cual lo que realmente adquiere importancia son las variaciones en la expresión génica y no la propia secuencia del

ADN. Los genomas no son elementos estáticos sino dinámicos y gracias a ello pueden producirse fenómenos de reorganización y neo-regulación de sus genes. La epigenética implica cambios en la actividad genética no basados en la secuencia de ADN de los genes, estos cambios depende entonces de: las interacciones entre células y entre tejidos; regulaciones epigenéticas como las metilaciones, las paramutaciones, el imprinting alternativo, el tamponamiento mutacional, la actividad de ARN interferente, la actividad de priones, etc; las propiedades físicas del entorno; la actividad y productos de otros organismos; las relaciones en consorcio, y los materiales maternos como proteínas y ARNs que son transmitidos al embrión. Si estos cambios fenotípicos no implican cambios en la secuencia de ADN y persisten una o varias generaciones hablamos de herencia epigenética.

La generación del patrón morfológico y su estructura modular se encuentran directamente relacionados con fenómenos que pueden parecer contrarios a los anteriores, pero si bien éstos estaban relacionados con la adaptabilidad del sistema, los siguientes fenómenos lo están con su robustez. Estos fenómenos son la canalización y la estabilidad del desarrollo. La canalización implica que diferentes genotipos y ambientes puedan acabar originando un mismo fenotipo, esta supresión en la variedad de los fenotipos implica una disminución de la varianza interindividual, produciéndose un único resultado final del desarrollo. La estabilidad del desarrollo implica que ante unas mismas condiciones siempre suceda o se genere lo mismo, esto es una propiedad emergente de los sistemas complejos que una vez que alcanzan cierto orden, su varianza aleatoria es dificultada. Si bien hemos dicho ya que los cambios evolutivos se producen cuando la robustez del sistema es superada y la entidad puede seguir viviendo y reproduciéndose, será imprescindible por tanto que la canalización del desarrollo sea alterada durante el proceso evolutivo.

El fenómeno de la descanalización determina por tanto de forma directa los mecanismos de modificación del patrón preexistente. Todo genotipo difiere en su grado de canalización, siendo éste más o menos plástico. El fenómeno de la canalización permite la coexistencia de genotipos variados bajo un mismo fenotipo o bauplan, por tanto, esta diversidad genotípica no es detectable a nivel fenotípico. Existen por tanto elementos tamponadores de las mutaciones del genotipo que actúan como canalizadores. Estos tamponadores son HUBs de las GNRs, entendiendo por esto que son elementos de importancia vital en las redes de regulación génica, ocupando un papel central en éstas y dotando al sistema de robustez. El proceso de almacenaje y posterior revelado de mutaciones y variaciones genéticas crípticas se conoce como capacitancia evolutiva. Estos tamponadores actúan como capacitadores evolutivos, ya que si son alterados se dispara la aparición de una enorme variabilidad fenotípica previamente no detectable debido a la canalización de la diversidad genotípica hacia un único desarrollo fenotípico. La alteración de estos capacitadores, como es el caso de las proteínas de choque térmico, desencadenan la aparición de fenotipos mutantes cuyo desarrollo se veía impedido; estos fenotipos nuevos originados a partir de variaciones y mutaciones del genotipo preexistente ahora pueden ser incorporados por la descendencia.

Este es el inicio de la confrontación que enfrenta a estas novedosas propuestas e interpretaciones evolutivas con la teoría evolutiva sintética derivada del neodarwinismo, la cual rige de manera dogmática el paradigma de la biología actual (pese a que se podría afirmar según este mismo paradigma y en un alarde de reduccionismo que éste ya no rige la biología si no un conjunto de “ciencias biológicas”. Y es aquí donde

la logia de la vida, el decir de la vida y sobre ella, que configura la esencia que define la biología, pierde su significado de dialogo entre las partes e integración de ideas, y la biología pasa entonces a convertirse en un sin sentido).

¿Es posible la herencia de caracteres adquiridos y otros fenómenos negados por la teoría evolutiva vigente? La respuesta es sí. Aunque estos fenómenos no sean habituales y puedan considerarse raros, pero en todo caso también debemos determinar este mismo carácter para todos los cambios macroevolutivos.

Algo que siempre se ha considerado imposible es que un cambio fenotípico producido por factores ambientales pueda a *posteriori* ser fijado al generarse una mutación que permita que dicha variación fenotípica sea conservada en las poblaciones. Este fenómeno existe y hoy en día se conoce como asimilación genética. Es decir se genera una variación fenotípica que inicialmente no implica ningún cambio en el genotipo, pero una vez que dicho fenotipo nuevo constituye una adaptación para el organismo, éste es fijado en la población mediante la aparición de una mutación genética que permite desarrollar y heredar el nuevo fenotipo de forma constitutiva. Patrones favorecidos, o más bien que permiten la adaptabilidad del sistema a su entorno, provocan cambios en la red que recanalizan el desarrollo hacia dicho patrón morfofisiológico final. El mecanismo de la asimilación genética implica la existencia de mutaciones dirigidas con significado evolutivo.

Los caracteres adquiridos que afectan a las células somáticas pueden a su vez traspasar la barrera somatogerminal. Hecho negado vehementemente por el paradigma actual pero que ya ha podido ser demostrado mediante experimentación. Esta barrera se puede cruzar en todos los organismos aunque sea de modo casual, y este proceso puede venir mediado por la transferencia de esta información de células somáticas a germinales debido a la acción de retrovirus endógenos. Los experimentos de terapia génica en los cuales han sido empleados como vectores retrovirus, han demostrado que esto ocurre y a su vez que dichos experimentos abusan de cualquier limitación ética impuesta y que bajo ningún concepto deberían de seguir llevándose a cabo.

Un claro ejemplo de fenotipo adquirido que se convierte en inherente puede ser el de las callosidades de los avestruces, pese a que se pensaba que éstas eran producidas como adaptación mediante la diferenciación de la epidermis debida al roce con el suelo y a la temperatura de éste, ha sido observado que el callo ya existe en el mismo embrión de la avestruz. Es decir primero se produciría el cambio fenotípico y posteriormente surgiría una mutación que permitiese que el nuevo fenotipo sea expresado ya en el desarrollo del animal.

Recapitulando la información expuesta podemos reconstruir un proceso de aparición de novedades e innovaciones evolutivas alternativo al defendido por el paradigma científico actual. La descanalización mediada por un capacitador evolutivo puede revelar variación genética críptica. Esta descendencia en ese momento pierde la dependencia de ese capacitador mediante asimilación genética. Tras esto el capacitador puede quedar desconectado de la red de regulación e interacciones a través de mecanismos epigenéticos.

Otro rasgo característico de un cambio macroevolutivo, además de ocurrir en momentos puntuales de estrés ambiental, es el que éste tenga que ocurrir a nivel

poblacional y no de forma aislada en un único individuo. Así estas remodelaciones de múltiples individuos a la vez permiten explicar los fenómenos de coevolución sin los cuales el mantenimiento de la estructura de los ecosistemas a lo largo de la evolución es posible. Ya que para mantener la compleja red de los ecosistemas es imprescindible un cambio conjunto.

Un punto de fricción con la teoría evolutiva clásica es la interpretación de las repeticiones evolutivas u homoplasias y la equivalencia funcional de módulos no homólogos. En la naturaleza es realmente frecuente encontrar estructuras homólogas muy diferentes unas de otras y estructuras sin homología alguna sorprendentemente similares. Estas repeticiones y coincidencias en la evolución morfofisiológica de seres vivos no emparentados recibe el nombre de homoplasia. Las homoplasias han recibido su explicación desde el punto de vista de las convergencias evolutivas y las radiaciones adaptativas en paralelo.

Las definiciones de estos conceptos son: *“Notable incremento en el número de individuos y variedad de los mismos dentro de un taxón como consecuencia, por ejemplo, de un determinado cambio ambiental que les permite colonizar ampliamente un hábitat sin competencia alguna o de una adquisición de ventajas adaptativas con relación a otro grupo. Ello trae consigo una mayor diversificación, especialización y explotación de los distintos nichos que componen ese hábitat”* en el caso de las radiaciones adaptativas, y en el caso de las convergencias, *“la adaptación a un medio concreto, trae consigo la aparición de estructuras similares sin que ello signifique un origen común”*. Pero si fijamos la atención en ciertos datos llegamos a pensar que esta respuesta para los procesos evolutivos fue indebidamente expeditada.

Nos planteamos incógnitas acerca de la existencia de otro mecanismo capaz de dar lugar a los efectos finales de las llamadas radiaciones adaptativas y producir el resultado final multiplicado varias veces en paralelo para dar lugar a toda la variedad de homoplasias que hoy encontramos, así como su rápida aparición en la historia de la vida. Es muy probable que la aparición de toda la variedad morfofisiológica, por ejemplo en la radiación de los mamíferos, dando lugar además a especies altamente emparentadas con morfologías dispares y especies en absoluto emparentadas con morfologías casi idénticas, no pueda explicarse razonablemente mediante una hipótesis de presiones competitivas entre los diversos individuos para así conseguir una serie de especiaciones. Tampoco es fácil ajustar esta aparición al corto periodo de tiempo en la que tuvo lugar, y enmarcarla en un ambiente tan poco proclive para la explicación competitiva, debido a que los nichos que componen los ecosistemas se encontrarían mayoritariamente vacíos tras las grandes extinciones. Y es justo en estos momentos cuando se producen los cambios macroevolutivos de mayor relevancia. Por supuesto esto implica que de suceder según el modo defendido tradicionalmente, es imposible que lo haga respetando la pauta del equilibrio puntuado defendida a su vez por la teoría sintética.

Según las nuevas propuestas e interpretaciones evolutivas, no sería la presión adaptativa mediada por una competencia regida por la selección natural la que resultaría en una variación morfológica, sino la variación morfológica la que daría lugar a que dicha entidad biológica se encuentre adaptada a su entorno y sea viable. De igual modo no sería la presión competitiva la interpretación de las convergencias y homoplasias,

sino que una vez producidos los cambios necesarios en las redes de regulación, se diesen repeticiones en las morfologías finales resultantes tras los procesos de desarrollo.

Quizás la vida y por tanto su expresión a través de la biodiversidad es tal cuál es porque no pueda ser de otra forma, esto significa que las posibilidades de cambio en el desarrollo para acabar dando sistemas biológicos viables son finitas. Es posible que pueda existir algún proceso que marcara a la vida para desarrollar un tipo particular de morfologías, es decir, que la materialización de la vida tuviese una gran variabilidad predeterminada con la cual únicamente contase y a partir de la cual, “jugando” con todas las posibilidades viables, fuesen apareciendo sobre la faz del planeta todas los tipos de morfologías posibles, pero no cualquier tipo de éstas, sino unas concretas.

La repetición de estos paralelismos es clasificable prácticamente como milagrosa si se tratara, como se ha postulado, de mutaciones al azar sometidas a la selección natural para conseguir dichas morfologías gradualmente y de forma fortuita, en cambio tendría sentido bajo la hipótesis de formación de redes encargadas del desarrollo que dan lugar a morfologías finales similares en animales sin parentesco alguno.

Varios enigmas evolutivos pueden encontrar explicación bajo este mecanismo. La increíble similitud y convergencia entre placentarios y marsupiales. Siendo mucho más alejadas sus relaciones filogenéticas, que las de animales adaptados a la vida aérea, como los murciélagos, y animales adaptados al medio acuático, como las ballenas. los nichos ecológicos son ocupados por animales con morfologías extraordinariamente similares, haciendo la comparativa, lobo-lobo marsupial, jerbo-jerbo marsupial, ardilla voladora-ardilla voladora marsupial, oso hormiguero-osos marsupial, y así una infinidad más. Quizás esto además implique que en ciertas ocasiones durante el proceso evolutivo sea una misma morfología la que es empleada como una misma adaptación y no que una misma adaptación de lugar a morfologías similares. Es decir, tras un momento de gran estrés ambiental, los genomas y las redes de regulación génicas sufren reorganizaciones que acaban dando a una variedad concreta de morfologías finales tras el desarrollo, y según un animal o ser vivo presente una u otra se encontrara de antemano preadaptado a cierta forma de vida. Esto implicaría una supervivencia de todas las formas viables y aptas para la vida, y no tan sólo la supervivencia de las más aptas. Así se explicaría también que si tras el reordenamiento de las redes de procesos de regulación del desarrollo se obtiene una entidad alada, esta vaya a desarrollar una vida relacionada con la capacidad de vuelo, es decir esto podría interpretarse en ciertas ocasiones como que el caballo no posee un único dedo porque ello le haya concedido una mayor capacidad para la carrera, sino que una vez remodelado la regulación del desarrollo de un antecesor suyo, la morfología resultante posea sólo un único dedo y gracias a ello posee una gran capacidad para la carrera.

La biología ortodoxa contestaría que estas homoplasias no son otra cosa sino la aparición de formas paralelas y similares entre animales no relacionados, mediante la evolución gradual y al azar en respuesta a la adaptación en un medio de vida concreto, es decir, un proceso fortuito en el que la suerte a promovido que el azar acabe dando una estructura casi idéntica tras una selección resultante de la competencia. Pero podríamos encontrar, en base a nuestras hipótesis, una explicación que prescindiera del carácter paranormal y de omnipotencia atribuido al azar por el paradigma actual. Podemos afirmar que la aparición de morfologías similares no se debe a la suerte sino a la posibilidad de aparición de idénticos o muy parecidos desarrollos estructurales y

morfofisiológicos en animales muy diferentes y para órganos y estructuras particulares, produciéndose en consecuencia final la aparición de morfologías similares, no por el azar, sino por un patrón de desarrollo morfogénico similar aunque éste no sea homólogo. Las estructuras análogas serían por tanto estructuras con un patrón morfogénico similar y no simples convergencias al azar.

Ésta puede que sea la cuestión detrás de la aparición de cuellos exageradamente largos en ciertos animales, explicaría que la vida puede desarrollarse dando dicha morfología y por tanto se producirán secuencias reguladoras que actúen sobre la embriología del cuello dando dicho aspecto final, es posible que este similar tipo de regulación para el desarrollo del cuello largo fuese compartido por animales tan diferentes como la jirafa y algunos dinosaurios extinguidos como el diplodocus o el plesiosaurio. A su vez fenómenos observables del mismo tipo aparecen en el desarrollo de los dientes con morfología de “sable”, que no solo aparecen en extintos felinos sino en rumiantes como algunos ciervos; aparecen en las morfogénesis de especies con formas insectívoras nada emparentadas; aparecen en la formación de alas, aletas y repliegues cutáneos como los que permiten la capacidad de planear en diversos animales sin parentesco alguno; aparecen morfologías idénticas entre plantas sin parentesco y perfectamente adaptadas a ambientes extremos como los desiertos; aparecen formas ápodas en gran diversidad de taxones; aparecen coloraciones, morfologías y patrones comportamentales muy similares en animales muy distintos pero que acaban siendo casi idénticos; etc.

No podemos olvidar que algunos de estos caracteres aparecen de forma independiente en las diversas ramas filogenéticas. Algunos que se creían caracteres diagnósticos clásicos de grupos emparentados no son otra cosa que resultados finales y soluciones que tienden a aparecer de modo independiente a lo largo de la evolución. Es decir, redes diferentes en la regulación acaban dando los mismos caracteres. Esto es el ejemplo antes citado de las alas, pero no debemos olvidar la presencia o su ausencia del celoma en metazoos no emparentados, o la aparición de formas bípedas, o la aparición de la segmentación corporal.

Además cambios en la regulación del desarrollo pueden derivar en resultados no explicables satisfactoriamente por el paradigma actual. Es el caso de las regresiones evolutivas que además suelen dar lugar a homoplasias debido a pérdidas secundarias en alas de pájaros e insectos, o la de ojos y pigmentación en animales de hábitos cavernícolas. Bien podría ser que estas pérdidas en vez de haber sido seleccionadas mediante competencia, fuesen simplemente cambios en la regulación de la red de desarrollo de dicha estructura, y que éstos diesen resultados finales similares. También sería posible dictaminar que cambios producidos, como por ejemplo en ambientes cavernícolas, den lugar a polifenismos similares entre especies dispares al producirse un tipo concreto de modificación morfofisiológica ante un estímulo ambiental externo. En ambientes cavernícolas no se da únicamente la pérdida de pigmentación y ojos o estructuras fotorreceptoras, sino una remodelación estructural a nivel anatómico general del individuo. Quizás durante el desarrollo pudiese ser detectada dicha ausencia lumínica o que debido a esta ausencia se produzcan remodelaciones a nivel de desarrollo morfogénico, esto implicaría que en ausencia de luz no se fuesen a desarrollar a partir de los mismos genes una estructura de morfología similar. La luz podría influir en la formación de la lente cristalina y que ésta lo haga a su vez sobre la copa óptica, y se obtuviese así ojo o no en presencia u ausencia de luz. Otro es el caso de los

eritrocitos nucleados que aparecen en los camellos adultos. Esto es sencillamente explicable desde el punto de que todos los mamíferos en etapas tempranas del desarrollo poseen eritrocitos nucleados, quizás simplemente en los camellos se ha visto modificado este proceso de maduración a nivel del desarrollo y han permanecido estables los eritrocitos con núcleo.

Como ya ha sido expuesto, los genomas son dinámicos y un gen puede adquirir diferentes funciones según el proceso, momento, tejido o ser vivo concreto en el que se exprese. Este fenómeno de diferentes funciones de un gen, que por supuesto mantiene siempre una misma secuencia, dependiendo de diferentes procesos y momentos en los que se exprese, se denomina coopción, y podemos destacar que es muy común entre los genes que participan en las redes de regulación del desarrollo. Las innovaciones genómicas acompañan a las filogenéticas, y son de gran importancia los fenómenos de coopción génica y evolución intercalar. Por tanto un gen en diferentes momentos puede dar lugar a diferentes estructuras y si es expresado en otro tipo celular puede dar también un tipo de estructura diferente y nueva. Siendo el gen y la proteína resultante de su traducción la misma, su función puede ser diferente porque en otro momento o lugar puede interactuar con una red genética distinta. Así observamos que a lo largo de la evolución la misma proteína ha sido reclutada varias veces para realizar una misma función secundaria y se ha cooptado por tanto un mismo gen para dar de forma secundaria a una misma estructura. Del mismo modo observamos que la coopción de genes diferentes puede dar lugar a estructuras muy similares y la coopción del mismo gen, puede dar lugar a estructuras con un mayor grado de diferencia final.

Es de gran importancia destacar el fenómeno de la evolución intercalar, según la cual, en el desarrollo se irán añadiendo pasos intermedios para así cambiar el resultado final. Esto quiere decir que no todas las innovaciones se van sumando al final de los procesos de desarrollo sino intercalados en ellos, lo cual implica que cuanto más cercano al inicio del proceso de desarrollo sea integrado el nuevo paso, mayor será la diferencia obtenida en el resultado final. Este tipo de ejemplos en la evolución intercalar son observables en la placentación y formación del sincitotrofoblasto en primates, la poliembrionía de armadillos y avispas parásitas. Mediante evolución intercalar puede producirse que en un organismo haya un paso de sincitio previo al celular, y en otro uno de modo inverso pero que ambos puedan acabar dando un insecto.

Tan impactante como la repetición de soluciones y morfologías casi idénticas en organismos sin ningún tipo de parentesco, es el hecho de que en la naturaleza un mismo conjunto de genes sea usado por organismos completamente diferentes para dar lugar a una estructura semejante, pese a que dicha estructura y su proceso de desarrollo no sean en ningún caso homólogos. Éste es el caso de los órganos fotorreceptores u ojos, en cualquiera de sus variantes. Si se expresan el conjunto de genes que en un organismo regulan el proceso de desarrollo del ojo en otro organismo, se da lugar a que se inicie un proceso de desarrollo, aunque éste no sea homólogo, que acabe dando órganos fotorreceptores típicos de la segunda especie pese a que no sean homólogos, ya que sus desarrollos tampoco lo son, pero que si poseen la misma función o una muy semejante. Esto ocurre por ejemplo al expresar el proceso de desarrollo del ojo de ratón en mosca, y lo que se acaba obteniendo es un ojo ectópico de mosca.

Esta hipótesis plantearía que si bien tanto *Drosophila* como el ratón poseen los mismos conjuntos de genes para la formación de estructuras receptoras fotosensibles

(ojos), *Drosophila* no poseería el mismo sistema de regulación del proceso de desarrollo que el ratón, por lo que se darían procesos de desarrollo completamente diferentes, no homólogos, pero el resultado sería una estructura fotorreceptora en ambos casos. Es posible entonces admitir que si *Drosophila* presentara la misma red de regulación que el ratón, el proceso de desarrollo resultante podría llegar a ser prácticamente idéntico, al igual que lo sería el resultado final, es decir un ojo de mamífero. *Drosophila* por tanto posee la información para dar lugar al complejo ojo de mamíferos, pero lo más importante es que no posee las mismas “herramientas” que el ratón, es decir la misma red de regulación genética para su desarrollo, y por lo tanto los patrones morfofisiológicos del fotorreceptor final serán completamente diferentes. Si en invertebrados se produjese un reordenamiento de su GNR para el desarrollo de los fotorreceptores, o si un módulo nuevo cooptado fuera intercalado al principio de dicho proceso de desarrollo se podrían obtener ojos mucho más complejos similares a los de vertebrados o mamíferos mediante un proceso de evolución intercalar. De hecho existen invertebrados como los cefalópodos con ojos similares a los de los vertebrados en cuanto a su complejidad, pero que no responden a ninguna homología.

Finalmente también es explicable mediante esta hipótesis la diversidad de estructuras homólogas, es decir, que estructuras similares apareciesen en la naturaleza con morfologías muy diferentes, como es el caso de nuestras manos, una aleta de ballena o un ala de murciélago. Esto no se debería a un cambio gradual y aleatorio, basado en mutaciones puntuales y azarosas, sobre las que ha actuado la selección natural para dar como resultado dicha morfología, debido a una adaptación gradual al medio (morfologías a su vez muy similares a otras no homólogas). La explicación sería que una estructura de origen embrionario similar fuese o estuviese expuesta a diferentes planes o programas de desarrollo embrionario en distintos animales; así, en los que la estructura se viese finalizada como ala, serían animales capacitados para el vuelo y que por tanto se encontrarían adaptados a una vida aérea, y en los que la estructura ha finalizado dando una aleta, permanecerán en el medio acuático al que se encontrarían adaptados. Lo que realmente determina la estructura final es la red de regulación durante el proceso de desarrollo.

Por tanto aparecen sintagmas conservados que siempre acaban dando a un tipo de estructura más o menos similar pero con una función semejante. Pero además sintagmas enteros y conjuntos de genes enteros pueden ser cooptados y ser empleados en su conjunto para llevar a cabo otro tipo de función completamente diferente, lo cual depende del momento en el desarrollo y lugar en el que sean expresados, bien en diferentes tejidos o en organismos de diferentes especies. Lo que marca el resultado final, es siempre la red de regulación génica en la que se integran.

Después de todos los datos aportados, se nos plantean algunas preguntas... ¿Pero sería además posible que la presión ambiental de un medio acuático produjese una respuesta encaminada al desarrollo de aleta y repliegues cutáneos que faciliten su locomoción en un medio acuático? ... ¿Podría ser éste el mecanismo oculto en humanos que explicase el porqué los miembros de una familia se parecen, e incluso explicase la existencia de dobles o personas de semejante aspecto físico no pertenecientes a la misma familia del individuo al cual son semejantes? Es decir, ¿poseerían los individuos semejantes procesos finos de regulación morfogénica similares? Si la variabilidad morfológica a la que se da lugar mediante redes de regulación de desarrollo es finita, ¿sería ésta la respuesta a que en individuos sin parentesco se produjesen morfologías

parecidas al darse repeticiones en dicha variedad finita de diversidad morfológica? ¿sería debido a la aparición de finos procesos morfogénicos similares? (procesos morfogénicos en ocasiones homólogos, como en el caso de los rasgos de la cara entre humanos que no proceden de una misma familia, pero no homólogos en otros, por ejemplo entre mamíferos con morfología tipo insectívoro siendo estos euterios y metaterios).