

La búsqueda del comienzo

El pensamiento complejo en biología

Lorena Caballero

IFUNAM

Universidad Autónoma de la Ciudad de México

ISBN: 978-0-9831172-7-8

Ciudad de México

CopIt ArXives

2008

CopIt ArXives

Ciudad de México Madrid
Boston Cuernavaca Viçosa
Washington DC

Copyright © 2008 por Lorena Caballero

Publicado 2008 por CopIt ArXives

Todos los derechos de propiedad de esta publicación pertenece al autor quien, no obstante, concede su autorización al lector para copiar, imprimir y distribuir su trabajo libremente, en partes o completo, con la única condición que (i) el nombre del autor y el título original del trabajo sea citado en todo momento, (ii) que el texto no sea modificado o mezclado y (iii) el uso final de este contenido no debe ser comercial, el incumplimiento de estas condiciones será una violación a la ley.

Producido electrónicamente usando software libre y en cumplimiento con un espíritu Open Acces para publicaciones académicas.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	v
Introducción	1
1. Los sistemas complejos ante los límites de la ciencia clásica	7
1.1. Caos: ¿obscuridad infinita?	14
2. Sistemas dinámicos y desarrollo de las formas vivas	19
2.1. Antes y después de Darwin. Una analogía irónica	20
2.2. Etienne Geoffroy Saint- Hilaire y la búsqueda de la unidad en la composición	25
2.3. El debate entre Geoffroy y Cuvier	29
3. Los disidentes	33
3.1. El arquetipo resultó ser real y el escarabajo lucha en nuestro interior	33
3.2. D'Arcy Wentworth Thompson y el otro secreto de la vida	38
3.3. La teoría de las transformaciones: las leyes matemáticas de la vida o una simple fantasía	42
4. Complejidad y biología moderna. Del Big Bang al Proyecto Genoma humano	47
4.1. La simetría, una ley que debe romperse	47
4.2. Las propiedades protegidas de la materia	50
4.3. La generación de formas, una respuesta emergente	53
4.4. El proyecto Genoma Humano y el todos somos genes	58
5. Discusión	65

Agradecimientos

Quisiera hacer un reconocimiento al apoyo económico otorgado por parte del CONACyT dentro del programa de doctorado en Ciencias Biológicas. Al Posgrado en Ciencias Biológicas y al Instituto de Física de la UNAM ..

Al Dr. Germinal Cocho, al Dr. Pedro Miramontes Vidal, a la Dra. Dení Claudia Rodríguez Vargas, al Dr. Octavio Miramontes Vidal y Alberto Salazar.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar algunos aspectos relacionados con las teorías del caos y la complejidad, como fundamentales para la investigación en biología. Con este fin se plantean algunos principios teóricos y características de los sistemas complejos que es necesario considerar para una mayor comprensión de los fenómenos vivos, incluyendo en ello la integración del caos como parte generativa del desarrollo de múltiples sistemas.

En este marco se expone la problemática que se ha generado a partir del reduccionismo en la ciencia y cómo éste ha afectado el desarrollo de las teorías alrededor del surgimiento y evolución de las formas vivas y se hace una crítica sobre el camino en que las teorías acerca de la evolución de la vida explican los fenómenos complejos como simples procesos aislados, cuestionando las posiciones que consideran que las teorías de Darwin y especialmente la de la selección natural como clave única, son las que tienen mayor capacidad de explicar el proceso evolutivo. En contra de estas ideas se retoman otras posiciones como las teorías de Étienne Geoffroy Saint Hilaire y de otros pensadores quienes establecieron distintas líneas de pensamiento alrededor de la evolución, las cuales fueron excluidas de la ciencia predominante. La base de los planteamientos de dichos estudiosos era la forma y su estructura; buscaban unidades o patrones estructurales básicos dentro de los seres vivos. Dichos pensadores desarrollaron sus teorías alrededor de ideas que han sido precursoras para la nueva ciencia de los sistemas complejos, en tanto se acercaban más a los planteamientos en los que se considera a la vida, como sistemas dinámicos con estructuras complejas interrelacionadas.

Dentro de esta idea se rescatan algunas teorías de Geoffroy Saint Hilaire y Walter Gaskell que han sido reconsideradas en la ciencia moderna gracias a nuevas metodologías y nuevas tecnologías, comprobando que algunas relaciones entre diferentes organismos a nivel morfológico también existen a nivel molecular y genético, descubriendo patrones comunes durante el desarrollo embrionario. Esto lo planteo como una gran herramienta para una

mejor comprensión de las relaciones filogenéticas y evolutivas.

En este libro se presenta el trabajo de D'Arcy Wentworth Thompson, quien gracias al surgimiento de los sistemas complejos pudo ser rescatado del olvido dentro de la biología y muchos de sus planteamientos han sido retomados. Thompson fue el primer biólogo que consideró a las matemáticas como parte fundamental para la comprensión de la vida, ya que consideraba que los seres vivos eran el resultado de las transformaciones numéricas de una matemática distinta, la matemática de la vida.

De esta manera se muestran algunos de los mecanismos relacionados con la generación de formas en la materia, que han surgido en nuestros días como resultado de la investigación en sistemas complejos donde se observan patrones que describen de una manera integrativa los fenómenos de formación y evolución, introduciendo un punto muy importante en la comprensión de la aparición y evolución de la vida: el rompimiento de simetría, éste junto con otras propiedades de la materia, como la autoorganización, los protectorados, la emergencia, los atractores morfogenéticos, genera grandes cambios impredecibles y transformaciones sorprendidas que le dan a los seres vivos la capacidad de emerger con base en simples interacciones físicas y químicas. Para terminar, se toca un punto de gran interés en el desarrollo de la biología que es el desarrollo del Proyecto Genoma Humano, tomándolo como un síntoma de la persistencia de posiciones lineales, como el climax del reduccionista acerca del determinismo genético.

Introducción

La biología surgió como una disciplina formal, junto con la física y las matemáticas, con la suposición de que todo en algún momento sería descubierto gracias a la acumulación de conocimientos. Los avances en la investigación nos han hecho llegar a las partes más invisibles y más pequeñas existentes en las células, a descubrir las partes de los átomos que se creían indivisibles, a darnos cuenta de las complicadas interacciones ecosistemáticas, sólo por mencionar algunas de las complejas estructuras que se han establecido en nuestro planeta como resultado de la tendencia de la materia a evolucionar. Sin embargo, este conocimiento más que proporcionar la comprensión del todo ha permitido que nos demos cuenta de que en estos descubrimientos apenas empezaba lo más complejo.

Quise finalizar este último párrafo con una palabra clave en este trabajo: complejo.

Es complejo aquello que no puede resumirse en una palabra maestra, aquello que no puede retrotraerse a una ley, aquello que no puede reducirse a una idea simple. Lo complejo no puede resumirse en el término complejidad, retrotraerse a una ley de complejidad, reducirse a la idea de complejidad. La complejidad no sería algo definible de manera simple para tomar el lugar de la simplicidad, la complejidad es una palabra problema y no una palabra solución (Morin; 1994).

Al leer esta nota escrita por un estudioso de las humanidades en un libro llamado Introducción al pensamiento complejo nos damos cuenta que la necesidad de la búsqueda de la complejidad no está sólo en las ciencias; de hecho han existido paralelismos importantes en diferentes disciplinas en las que las explicaciones se han centrado en los sistemas dinámicos. Quizá los enfoques eran distintos pero de alguna manera se estaba gestando “el pensamiento complejo”. Pudiera parecer que la inclusión de las humanidades

en un texto de biología en este momento está fuera de lugar, pero desde mi perspectiva siempre hay en el pensamiento científico una influencia de las humanidades.

Por todas estas razones este libro puede parecer extraño para algunos lectores que esperarían un trabajo convencional en biología, por lo que me parece necesario resaltar aquí que aunque tiene esta particularidad, los diferentes objetivos, la lógica y formato tienen el objetivo fundamental de contribuir a la biología, enfocándose específicamente en la biología del desarrollo y el surgimiento de las formas vivas. La diferencia es que me aproximo mediante la reconsideración de algunas de las herramientas básicas que han usado algunos biólogos para analizar la riqueza de la complejidad.

En este trabajo presento el rechazo del pensamiento lineal y de los modelos reductivos de la ciencia (incluida la biología) por lo que la presentación de mi trabajo ha tenido que alejarse en cierta forma de la manera convencional de exposición que se utiliza en muchos trabajos (hipótesis \implies experimentos \implies resultados \implies comprobación o no de las hipótesis \implies discusión).

El planteamiento general de este libro es que los conceptos que se desprenden del estudio de los sistemas complejos pueden producir nuevos entendimientos de los procesos y estructuras biológicas. El campo en donde se desarrolla este trabajo consta de ejemplos en momentos de la historia de la biología en donde se produjeron importantes aportaciones diferentes a las líneas establecidas aunque éstas no hayan sido reconocidas en su tiempo. Los ejemplos son parte de la historia del pensamiento, pero en este texto funcionan más bien como momentos en la evolución de las ideas, como descripciones y análisis de un conjunto de teorías que existen dentro del 'gen' intelectual en la biología y que son tan importantes de preservar como cualquier especie en peligro de extinción.

El que se haya centrado fundamentalmente en las herramientas del pensamiento y no en experimentos no hace que este trabajo sea menos biológico, como tampoco Darwin es menos biólogo cuando proponía nuevas maneras de entender las interrelaciones de toda la vida a partir de observaciones durante sus viajes. Los fenómenos biológicos existen en muchos niveles, desde los genes, moléculas y células hasta los sistemas ecológicos de comunidades de organismos en la biósfera. De acuerdo con posiciones reduccionistas, toda esta aparente diversidad puede ser reducida a algunas leyes fundamentales en los niveles cuánticos, aunque en la práctica la mayoría de los biólogos no son tan extremadamente reduccionistas, especialmente porque ello implicaría la desaparición de su ciencia como ciencia independiente. No obstante dentro de la biología todavía persiste un grado de reduccionismo en el sobredesarrollo de los estudios de el 'nivel más fundamental': el gen como si

éste pudiera explicar toda la complejidad de niveles más altos (fisiología, anatomía, ecología, comportamientos diversos y características de la biota, desde las células hasta los seres humanos). De acuerdo con las posiciones antireduccionistas diferentes niveles muestran autoorganización por medio de principios que emergen y que no están contenidos en los niveles inferiores, por lo cual la complejidad total no puede reducirse a la complejidad en un solo nivel y menos aún a la de un elemento en sí.

Todo mundo escucha la palabra complejo e inmediatamente piensa en difícil e incomprensible y como es común la tendencia a creer que todo funciona bajo la ley del mínimo esfuerzo, no tratamos de entender que es lo que implica. El surgimiento de la teoría de la complejidad como método de estudio en múltiples disciplinas se dio como una necesidad de encontrar nuevas respuestas a problemas que no podían ser del todo resueltos con los métodos establecidos; en consecuencia se tuvo que elaborar un nuevo planteamiento filosófico que aportara nuevas respuestas. De este planteamiento se desprendieron un gran número de aplicaciones en diferentes disciplinas. Quisiera incluir una explicación que me gusta para comprender el desarrollo de este pensamiento pues, de una manera muy clara muestra las posibles interrelaciones que surgen entre fenómenos separados provenientes de mecanismos comunes. Esta cita se incluye en el libro de Katherine Hayles, *La Evolución del Caos* (1998):

... supongamos que una isla rompe la superficie del agua y emerge; después surgen otra y otra, hasta que el mar esté punteado de islas. Cada una tiene su propia ecología, su terreno y su morfología. Es posible reconocer estas singularidades y al mismo tiempo preguntarse si todas las islas forman parte de una cadena montañosa emergente y se vinculan entre sí no sólo por el sustrato común que comparten sino también por las poderosas fuerzas que les dieron origen.

En esta cita Hayles destaca un elemento que es muy importante para comprender los procesos complejos en las formas vivas. Es decir, la biología requiere para encontrar sus respuestas considerar la relevancia, no sólo de causas-efectos aparentes, sino también encontrar las fuerzas que actúan en los organismos y que vinculan a los seres actuales con aquellos que les dieron origen. A mi parecer, la parcialización del conocimiento en las investigaciones biológicas nos ha hecho perder la capacidad explicativa de las conexiones con las condiciones iniciales de los procesos en los seres vivos, condiciones que si bien son originarias, persisten como significativas en el desarrollo de los organismos resultantes.

El pensamiento complejo parte de considerar que en cualquier fenómeno del universo existen múltiples factores que interactúan como parte de los procesos de conformación y desarrollo y que generan muchas veces resultados impredecibles. En este sentido el análisis de todo fenómeno en cualquier disciplina, deberá integrar, no reducir; simplificar pero para acceder a la complejidad que nos permita aproximarnos a la comprensión de todos los aspectos que existen y se interrelacionan. En dicho pensamiento es importante considerar todo, incluso el azar. La complejidad demanda que en la investigación “la verdad” deba explicarse considerando todos los factores y sus interrelaciones y no, como lo han pretendido algunas formas de pensamiento reduccionista que han permeado durante siglos el desarrollo científico, a partir de generalizaciones de aspectos aislados.

Como este trabajo se desarrolla dentro de los intereses de las ciencias básicas y específicamente en la biología, me centraré en la aplicación de la teoría de la complejidad en el área de la evolución y biología del desarrollo. Me interesa aportar elementos que evidencien la relevancia de este acercamiento para que algún día llegue a tener dentro de la investigación en todas las ramas de la biología la misma importancia que ha alcanzado en las ciencias físicas y matemáticas. De ningún modo pretendo cubrir toda la historia del pensamiento, sino iniciar una reflexión que muestre la importancia de introducir estas teorías en cualquier tipo de investigación en biología. No se trata de excluir la investigación tradicional sino incorporar en ella la complejidad inherente a todo proceso biológico de modo que sea posible encontrar nuevas respuestas.

Las formas vivas; una muy vieja incógnita

El origen y desarrollo de las formas vivas es uno de los temas más controvertidos y explorados por hombres y mujeres y desde luego la ciencia ha tenido un papel muy importante. Las preguntas que se generan y se han planteado desde el comienzo de la humanidad alrededor de este tema son, ¿por qué surgimos? ¿de donde provenimos? ¿qué somos? ¿cómo se estructura y desarrolla cada parte del mundo vivo? ¿qué nos distingue de la materia inanimada? y muchas otras interrogantes que hasta la fecha siguen siendo claves en el desarrollo de la investigación.

La existencia de la vida ha prevalecido como un gran enigma para los seres humanos y gracias a la incansable curiosidad que nos caracteriza, hemos tratado de acercarnos lo más posible a las respuestas alrededor del problema de las formas vivas, desde diferentes concepciones y con múltiples inter-

pretaciones, pero inevitablemente buscando una respuesta coherente con el contexto temporal y cultural. En un principio la curiosidad por conocer el por qué de la existencia de la gran variedad de seres y formas en la tierra, se respondió con planteamientos y soluciones místicas a través de diversas religiones que surgieron en muy diferentes culturas, que aunque con distintos nombres planteaban básicamente lo mismo: todos estamos aquí por gracia divina. Ésta fue la creencia de muchos por muchos años y sigue siendo hasta la fecha una explicación por muchos aceptada.

A pesar del poder que ha tenido el dogma religioso, la ciencia ha tratado de responder estos planteamientos con base en la comprobación y no sólo como un acto de fe. Los hombres y mujeres de ciencia se alejaron de Dios y estructuraron las bases para nuevas vertientes en la comprensión de los fenómenos implicados en la vida; de esta manera se inició una carrera en la que la imaginación produjo grandes logros. En consecuencia la religión y la ciencia siguieron vertientes cada vez más separadas.

Los primeros científicos/as desarrollaron una gran cantidad de observaciones acerca de los seres vivos y su relación con el universo circundante. De hecho muchos de estos hombres y mujeres intentaron abarcar múltiples áreas de investigación, eran en resumen grandes eruditos/as que trataban de estructurar una filosofía de la ciencia, de esta manera la teoría nació como una importante herramienta intelectual.

En este momento, podemos ver la historia de la evolución del pensamiento humano. Estamos en un punto en el que la ciencia ha avanzado muy rápidamente y es el tiempo en el que debemos analizar el camino que se va a tomar para avanzar en la comprensión de los fenómenos naturales. La tarea de la ciencia es explicar la dinámica que encierra la presencia en nuestro universo, o por lo menos en la tierra, de una gran cantidad de formas observables y de esta manera encontrar los patrones y regularidades que se dan en base a características que les son comunes.

En este trabajo presento algunos de los planteamientos que han surgido como consecuencia de la búsqueda de respuestas alrededor de las formas vivas y propongo una línea de investigación que se basa en el pensamiento complejo como premisa para llegar a cualquier área de conocimiento, y en mi caso a la biología. Presento nuevos enfoques que se han desarrollado dentro de los sistemas complejos adaptativos, es decir dentro de los sistemas vivos y retomo las ideas de algunos pensadores, quienes en sus teorías muestran que la concepción de la vida, como un conjunto de fenómenos complejos, no es nueva pero sí muchas veces olvidada. De esta manera critico la idea de que sólo somos máquinas moleculares encargadas de sobrevivir en un mundo en el que el mejor gen tiene derecho a la existencia, y planteo la necesidad

de una línea en la que la vida sea vista no sólo como el resultado de sus componentes materiales.

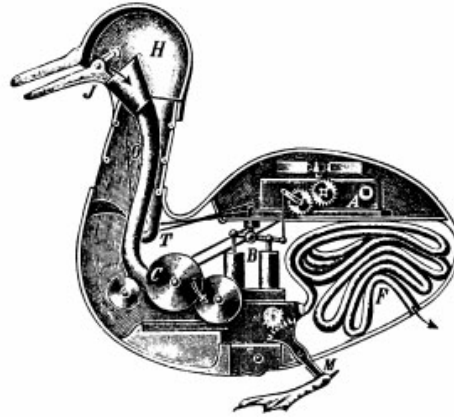


Figura 1. *Canard Digérateur*, esquema realizado por Jacques de Vaucanson en 1738, en el que muestra su famosa maquina que intentaba reproducir la digestión de un pato real como si fuera un automata.(en www.wikipedia.org)

Uno de los objetivos de este libro es mostrar la no linealidad en algunas partes de la historia del pensamiento científico; por esta razón la misma estructuración de esta investigación, llevó a seleccionar un grupo de autores que en diferentes épocas desarrollaron propuestas basadas en concepciones complejas sobre los fenómenos presentes en la naturaleza. Estas concepciones no siempre fueron comprendidas por las tendencias predominantes en su tiempo pero el desarrollo de la investigación ha mostrado la importancia de sus planteamientos.

Al destacar los aportes que estos autores han hecho al desarrollo del conocimiento, la existencia de un pensamiento complejo se hace evidente, incluso en la presentación de la historia de la biología. Desde el presente podemos observar que puntos aparentemente aislados, a nivel macro, se observan como claras partes de un sistema dinámico en el que la idea es entender los fenómenos naturales. Estas partes, todos los autores, interactúan configurando un conjunto que visto aisladamente se presenta como irrelevante pero que al observar sus relaciones y sus discrepancias con los científicos que siguen una línea de pensamiento considerada como la legítima, llegan a conformar un conjunto mucho más coherente. En este caso, la historia de la biología se ve como un fenómeno que aunque parece azaroso presenta un orden que estructura al conjunto.

Capítulo 1

Los sistemas complejos ante los límites de la ciencia clásica

En este primer capítulo mostraré algunos aspectos relacionados con las teorías del caos y la complejidad. Estos términos provienen de enfoques científicos, especialmente en física y matemáticas que también proporcionan elementos útiles para la investigación en biología. El material que se presenta no es exhaustivo sino sólo muestra algunas de las posibilidades que este tipo de acercamientos proporcionan para una mayor comprensión de los fenómenos que son objeto de estudio en dicha disciplina.

En los párrafos siguientes se utilizará algunos términos que es importante que comprendamos: El Reduccionismo, lo lineal, lo no lineal, y lo complejo. Estos conceptos son elementales para iniciar una discusión acerca de los sistemas complejos .

Reduccionismo es el término dado al método de adquisición de conocimiento en el cual para comprender cualquier proceso debemos de llegar a las partes más pequeñas, es decir separar los componentes que articulan los fenómenos y de esta manera adquirir el mayor grado de información acerca de los mismos. La sobregeneralización a partir del estudio de casos específicos en muchas ocasiones ha sido un problema en la investigación científica, incluso hasta nuestros días; generando una parcialización responsable de que se haya perdido la importante noción de organismo. “El organismo ha sido sustituido por una colección de partes: genes, moléculas y los componentes que se supone forman los ojos, las extremidades o cualquier estructura en la que uno esté pensando” (Goodwin en Lewin; 1995). El reduccionismo ha

logrado muchos avances en el conocimiento acerca de las partes, de los genes, moléculas y células, pero no ha podido realmente conocer acerca del conjunto, del organismo y de su forma. Para comprender las partes de los sistemas, necesitamos partir de la idea de que el organismo en su conjunto, es la entidad fundamental en la existencia biológica, a partir de este conocimiento podemos entender la estructura y el orden emergente.

Partiendo de este hecho debemos hablar del pensamiento lineal, éste surge como resultado del reduccionismo y acepta que los fenómenos siguen un comportamiento predecible y que al desmembrar las partes podemos comprender todo acerca del sistema. Dentro de los sistemas complejos se parte de la idea de que los fenómenos no son el resultado de una cadena causa-efecto en la que el resultado puede ser proporcional y predecible sólo con el conocimiento de las partes, se plantea que los sistemas se comportan de manera no lineal.

De este modo vemos que los sistemas vivos se desarrollan gracias a organizaciones complejas y son el resultado de múltiples interacciones dentro de varios niveles jerárquicos. La ciencia que consideran a la complejidad, plantea que para entender cualquier fenómeno es necesario partir de la idea de que los sistemas no se comportan de manera lineal ni predecible y que por lo tanto el estudio de los fenómenos no puede ser visto bajo la óptica del reduccionismo. A lo largo de este trabajo hablaré más profundamente de esta discusión.

El surgimiento de las teorías del caos y la complejidad se dio como resultado de la dificultad de explicar fenómenos naturales que no eran fácilmente descritos en los términos de la ciencia clásica, por lo que se planteó la necesidad de iniciar un rumbo diferente en la investigación en ciencias, de esta manera se caracterizó a estos fenómenos como sistemas complejos, siendo la complejidad “La gran frontera inexplorada” (Pagels en Lewin; 1995).

En general los sistemas complejos pueden ser definidos como fenómenos compuestos por una gran cantidad de componentes interactuantes simples, capaces de intercambiar información con su entorno y capaces de adaptar su estructura interna como consecuencia de tales relaciones. Como resultado, bajo algunas circunstancias, pueden surgir nuevos comportamientos. Dichos comportamientos no pueden ser vistos por partes o como subsistemas separados; son el producto de la acción colectiva. “El pensamiento lineal y la creencia de que el todo es sólo la suma de sus partes es evidentemente obsoleta” (Mainzer; 1994). La teoría de la complejidad surge como un nuevo paradigma en donde cualquier fenómeno contiene las interrelaciones de las partes. Como plantea Whitehead “no existe ninguna posibilidad de existencia separada y autónoma” (citado en Morin; 1998).

Es muy importante aclarar que si bien estos sistemas y su estudio son de reciente aparición dentro de la investigación en la física y la biología, el interés por comprender la complejidad inherente en todo fenómeno ha estado presente en muchos pensadores, como es el caso de D'Arcy Thompson, quien tenía una gran curiosidad por encontrar patrones matemáticos en las formas vivas. Sus estudios han sido considerados muy avanzados con respecto al pensamiento de su época, y por esta razón hasta este momento han sido realmente apreciados. Desgraciadamente muchos de esos pensadores fueron relegados, ya sea por no coincidir con las corrientes predominantes en su época o simplemente por lo prematuro de sus planteamientos.

En el presente no hay todavía un consenso para definir qué son los sistemas complejos, de todos modos se han desarrollado varios intentos para definir y explicar fenómenos que aunque diferentes tienen en común la multiplicidad de elementos e interrelaciones. Muchos fenómenos naturales que se comportan como sistemas complejos, poseen un comportamiento no lineal, es decir responden a patrones de causa efecto desproporcionados y tienen un comportamiento que va cambiando con el paso del tiempo; por esta razón son llamados sistemas dinámicos. Dicha dinámica se desarrolla en algún sitio intermedio entre el orden absoluto y lo aleatorio en el marco de una organización estructural donde aparecen ciertos patrones.

La aparición de estos fenómenos se da cuando los sistemas son extremadamente sensibles a las condiciones iniciales, de manera que alteraciones pequeñas pueden causar grandes efectos y grandes cambios causar insignificantes efectos; a éstos se le llama fenómenos no-lineales. Un ejemplo es el llamado "efecto mariposa", término nombrado por Edward Lorenz y es sin duda parte esencial de la no linealidad y de la incapacidad de predecir absolutamente la evolución de un sistema dado, de aquí la dificultad para comprender los fenómenos naturales con base en un seguimiento lineal. El hecho de que estos sistemas no puedan predecirse de manera absoluta es lo que ha generado la necesidad de buscar patrones que describan este grupo de sistemas que no pueden ser resueltos con base en las leyes de la física y matemática clásicas en las que se pensaba que los sistemas serían entendidos cuando se tuvieran las herramientas necesarias. Estas no tomaron en cuenta que el desarrollo de la complejidad está dado con base en interacciones sencillas. De hecho se ha comenzado a ver que la complejidad en sí misma posee leyes propias, que si se comprenden pueden ser simples y coherentes.

La posibilidad de realizar estudios de los sistemas complejos ha sido facilitada por el surgimiento de nuevos sistemas de cómputo que han incrementado la velocidad de procesamiento de datos y la capacidad de manejar grandes cantidades de información. Esto ha permitido la elaboración de

modelos que simulen patrones de comportamiento de tipo no lineal, llegando “a ser un acercamiento exitoso para resolver problemas en las ciencias naturales - desde la física del láser, el caos cuántico, y la meteorología hasta la modelación molecular en química y la simulación por computadoras del crecimiento celular en biología” (Mainzer; 1994).

Se podría decir que los sistemas complejos son sistemas aparentemente desordenados, tras los cuales existe un orden encubierto que por no ser visible desde toda dimensión se suponen azarosos. Es decir, nuestra incapacidad de descubrir las formas de organización de los sistemas con múltiples factores nos induce a pensar que dicha organización es inexistente. Philip W. Anderson, ganador del premio Nóbel, habla del estudio de la complejidad como la investigación que se encuentra en la frontera situada entre lo misterioso y lo ya entendido: la frontera de la complejidad. En esta frontera la consigna no es el reduccionismo sino la emergencia. Según Anderson:

Los fenómenos complejos emergentes de ninguna manera violan las leyes microscópicas; pero tampoco surgen como mera consecuencia lógica de tales leyes. . . El principio de emergencia es un fundamento filosófico convincente de la ciencia moderna como lo es también el reduccionismo. Este principio. . . representa una frontera abierta para los físicos, una frontera que no tiene barreras prácticas en términos de gastos de investigación o de credibilidad o si acaso las tiene serían aquellas de tipo intelectual. . . Esta frontera de la complejidad es por mucho la de mayor crecimiento en la física de hoy. (Anderson; 1995)

En este punto es necesario plantear las partes básicas que constituyen a un sistema complejo. Un sistema complejo puede desarrollarse en cualquier sitio en el universo, es decir no sólo surge como resultado de la organización viva. De hecho, los primeros antecedentes en el estudio de estos comportamientos fueron las transiciones de fase y los fenómenos críticos que presentan muchos materiales en las etapas de transformación de un estado a otro diferente. Es el caso por ejemplo de las sustancias magnéticas que presentan un orden interno, responsable de las propiedades características de dichos materiales. Este ordenamiento se rompe al aumentar la temperatura por arriba de un valor crítico, o cuando entra en un campo magnético mayor a cierto umbral. Estos sistemas han sido descritos por el modelo de Ising y los llamados vidrios de espín.¹

¹La dinámica de los vidrios de espín es un ejemplo de autoorganización conservativa

Al descubrir comportamientos no predecibles dentro de la materia se buscó la relación entre éstos y otros fenómenos, y se extrapoló este conocimiento para entender otro tipo de sistemas que se desarrollan en los organismos vivos, como es el caso de las redes neuronales y los sistemas adaptativos, los modelos de evolución biótica y prebiótica, en la biología molecular, en el análisis del desarrollo embrionario, y podríamos enumerar tantas aplicaciones como sistemas en el universo.

Los sistemas complejos son de tipo heterogéneo ya que sus componentes son de distintas naturalezas y de diferente escala. En dichos sistemas existen reacciones que se alejan del equilibrio produciendo en consecuencia fuertes momentos de crisis, esto se explica con el hecho de que la complejidad, como ya vimos, se desarrolla entre el caos y el orden. Por otra parte poseen procesos que pueden ser de distinta naturaleza, ya sea de tipo químico, eléctrico, circulatorio, mecánico: Un cierto parámetro siempre está afectado por muchas causas. Es inútil pensar que un fenómeno como lo es por ejemplo la gestación, se debe sólo a una causa. Por otra parte una misma causa puede generar múltiples efectos, como cuando se hace ejercicio; al mismo tiempo se suda, se tiene sed y cansancio.

Los sistemas complejos están estructurados en niveles con distintas jerarquías que poseen una organización significativa. La descripción de los distintos niveles requiere de leyes especiales que permitan comprender la complejidad en cada escala jerárquica y las vinculaciones entre ellas. Sus estructuras tienen configuraciones moldeables dependiendo del proceso, que les permiten evolucionar a través del tiempo y dadas las condiciones externas e internas del propio organismo. El número de opciones para adoptar una configuración en un punto de elección es infinito, sin embargo sólo puede tomar un número reducido de configuraciones.

Los sistemas complejos están en constante cambio. Estos cambios pueden producir bifurcaciones, es decir, en respuesta a una misma causa se generan efectos en direcciones alternativas que incluso pueden ser opuestos. A este proceso de elección-cambio en que se produce una bifurcación se le llama rompimiento de simetría. Frente a esta situación existe una respuesta a cierto estímulo (impredecible hasta cierto punto y dependiente del contexto), por lo que siempre se habla de que la vida se desarrolla en el borde del caos,

en equilibrio térmico; en el modelo de Ising un cristal de espín consiste de un reticulado de espines, cada uno de los cuales puede estar tanto arriba como abajo y puede interactuar con el vecino que se encuentra más cercano. En el estado en el que hay menor energía los espines se alinean en la misma dirección y a altas temperaturas su dirección se ubica de manera aleatoria debido a la energía térmica cuyas fluctuaciones son mayores que las energías de la interacción (véase Mainzer; 1994).

un punto en donde los componentes de un sistema nunca quedan fijos pero tampoco caen en situaciones completamente turbulentas, donde la vida tiene suficiente estabilidad para sostenerse a sí misma y suficiente creatividad para generar nuevas formas de continuidad (vease Waldrop; 1992:12).

Los sistemas complejos tienen en común una fuerte interacción con el medio “las condiciones de vida no residen en el organismo ni en el medio exterior, sino en los dos a la vez” (Claude Bernard, citado en Morin; 1998). Esto se debe a que son termodinámicamente abiertos, es decir que intercambian energía, materia e información con el entorno. Son fenómenos que toman configuraciones en cierta manera estables pero capaces de cambiar ante cualquier perturbación. Por esta razón podemos decir que son adaptativos:

Lo que tienen en común todos estos procesos es la existencia de un sistema complejo adaptativo que adquiere información acerca tanto de su entorno como de la interacción entre el propio sistema y dicho entorno, identificando regularidades, condensándolas en una especie de “esquema” o modelo y actuando en el mundo real sobre la base de dicho esquema. En cada caso hay diversos esquemas en competencia y los resultados de la acción en el mundo real influyen de modo retroactivo en dicha competencia (Gell-Mann; 1994).

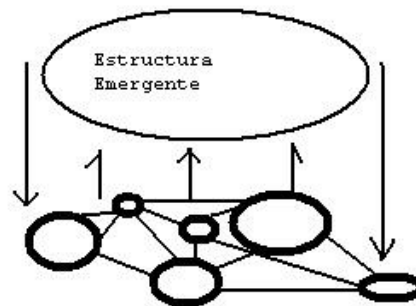


Figura 2. Esquema de la emergencia en los sistemas complejos basado en el de Chris Langton

Otro punto general dentro de los sistemas adaptativos es que tienen propiedades emergentes, dichas propiedades permiten que surjan nuevos niveles como resultado de un nivel inferior; las propiedades diferentes y novedosas que surgen en el nuevo nivel no son simples repeticiones o mínimas adaptaciones. Por ello no es posible predecir el resultado por medio de la

comprensión de una sola de las jerarquías, ni es posible saber como serán las siguientes. Por esta razón el pensamiento lineal no nos permite realmente comprender en su totalidad un sistema, debido a que su método de estudio parte de desmembrar los componentes y posteriormente unirlos como si se estuviera armando un rompecabezas.



Figura 3. Imagen satelital de un huracán en www.wikipedia.org



Figura 4. Grabado tomado de *L'Atmosphère. Des Grands Phénomènes de la Nature*. Camille Flammarion.

En los diferentes niveles de los sistemas complejos se presenta tanto estabilidad como diversidad ya que puede haber múltiples estados de equilibrio y simultáneamente presencia de desorden. No obstante el orden macroscópico resulta ser muy consistente en comparación con los cambios en la estructura interna del sistema, como en el ya conocido ejemplo: un huracán visto desde un satélite tiene un patrón estructural bien establecido, casi estático, pero pregúntele a la paloma que está adentro, que tan ordenado es un huracán.

En el mismo sentido Brian Goodwin, en su libro *How the Leopard Changed Its Spots* (1994), en donde habla acerca de los insectos sociales,

como las hormigas y las abejas (en las que los patrones de actividad individual son frecuentemente muy desorganizados) explica que sin embargo al analizar un gran número de individuos formando una colonia, podemos ver patrones de comportamiento e incluso ritmos de actividad que generan un orden espacial. Como menciona Goodwin en el libro antes citado “Esto ha resultado en uno de las premisas fundamentales de los estudios de la complejidad: el orden emerge a partir del caos” (1994).

Quise mencionar estos ejemplos pues en ellos podemos ver con claridad que la existencia de un sistema complejo no sólo se restringe a los seres vivos, sino a toda la materia, la que presenta un comportamiento similar, independientemente de esta condición.

La complejidad en la organización viva ha generado la gran variedad de formas que existen en la tierra como resultado de la evolución; de esta manera podemos darnos cuenta de que la evolución biológica es el resultado de interacciones entre sistemas físicos y químicos que generaron sistemas complejos que posteriormente formaron estructuras vivas a su vez complejas. Los sistemas vivos poseen tipos característicos de orden que emergen por la interacción de muchos componentes diferentes por lo que las causas no pueden ser comprendidas si los consideramos como simples sistemas físicos.

Una propiedad particular de estos sistemas es que a pesar de tener un desarrollo caótico a un nivel de actividad, moléculas o células u organismos, pueden generar un orden distintivo en el siguiente nivel como por ejemplo la morfología y el comportamiento.

1.1. Caos: ¿obscuridad infinita?

El pensamiento alrededor del caos y de lo que implica en nuestro tiempo empezó con la incansable necesidad de los pensadores y científicos de describir el mundo por lo que podemos empezar con algo de historia. La palabra caos proviene del griego $\chi\alpha\omicron\sigma$, que significa gas, y uno de los primeros en utilizarla al definir las características del gas fue Jan Baptista van Helmont, nacido de Bruselas en 1580. El descubrió que existían otros gases además del aire y demostró la existencia del bióxido de carbono al ver que los gases resultantes de la fermentación de la uva y de la combustión del carbón eran los mismos. Lo que me interesa aquí es la asociación que hizo van Helmont de las características de un gas y el significado de la palabra caos: primer estado del universo, materia amorfa, oscuridad infinita, oquedad o abismo muy vasto, por mencionar algunos de los significados que se pueden asociar con la visión de gas. En cierto modo, aunque no explícitamente, esta asociación

implicaba el reconocimiento de la importancia del caos como constitutiva del universo y al mismo tiempo de la dificultad para su comprensión.

Sin embargo el primero que utilizó la palabra caos, que en cierta forma se relaciona con la connotación científica moderna, fue Publio Ovidio Nasón, quien vivió del año 43 aC al 17 dC. El escribió un poema llamado *Metamorfosis* que contiene una colección de mitos y leyendas ordenadas cronológicamente. En ellos habla del surgimiento del orden a partir del caos (véase Miramontes; 1998).

Aunque esta noción de caos es muy antigua fue excluida del pensamiento científico durante siglos. Fue común más bien la tendencia a considerar que todo podía ser puesto dentro de reglas establecidas acerca del orden y de leyes que los llevarían a predecir con exactitud el futuro y comprender cualquier proceso visible y no visible del universo vivo y no vivo:

Galileo sentó las bases de la ciencia moderna al matematizar algunos fenómenos de la mecánica; él es uno de los “gigantes” en los cuales se apoyó Newton para concebir y producir su obra magna, tanto que una vez completada por pensadores de la talla de Bernoulli, Laguerre y Laplace, nos heredó una visión de un universo completamente racional y en el que, cual mecanismo de relojería, el conocimiento de las reglas de funcionamiento y de las condiciones en un instante dado, nos garantizan el conocimiento inequívoco de todo el futuro (Miramontes; 1998).

El problema para la ciencia surgió cuando el azar complicó la predicción del futuro. Laplace creía que el azar era una medida de desconocimiento humano de las condiciones de un sistema y fue uno de los fundadores de las leyes de probabilidad, en donde entraban todos los fenómenos que no podían ser comprendidos como engranes de una máquina perfecta. Poco a poco la suma de las partes del rompecabezas conducirían al conocimiento del todo. De esta manera es que se consideró a lo azaroso o aleatorio como el pato feo de la ciencia. Desde este momento el mundo se dividió en sistemas determinísticos en los cuales se pretende predecir el futuro desde su estado inicial y los sistemas aleatorios en los que no puede fácilmente predecirse el futuro y sólo es posible acercarse por el uso de la probabilidad. Actualmente, la investigación científica ha llegado a reconocer que “el papel principal de la ciencia es explicar. Si su tarea fuese predecir estaría en un grave aprieto, pues los sistemas de la naturaleza, que constan de varios elementos que interactúan de manera no lineal son intrínsecamente impredecibles” (Miramontes; 1998).

Otra fuente de curiosidad científica fue la Luna. La Luna además de ser de gran inspiración para los enamorados, es un punto muy importante en este problema. La luna gira alrededor de la Tierra con una influencia recíproca con ella y con el sol. Esto ocasionó que los cálculos de Newton acerca de las órbitas de los planetas no funcionaran en lapsos de tiempo mayores. La luna atrae a la tierra causando perturbaciones en la distancia de la tierra y el sol, lo que a su vez altera la órbita de la luna alrededor de la tierra. Al desconocer que la interacción entre los tres cuerpos celestes, lunas, planetas y sol, interactúan recíprocamente en todos los planetas del sistema solar, la base original para sus cálculos de la atracción gravitacional tenían fallas. En consecuencia había que empezar desde cero ya que el comportamiento no era periódico ni predecible, ahora diríamos que se trataba de un sistema dinámico, no lineal.

Posteriormente Henri Poincaré en 1890 publicó un trabajo titulado *Acerca del problema de los tres cuerpos y de las ecuaciones de la dinámica*. En él planteaba que este problema no podría ser descrito por medio de ecuaciones newtonianas y trabajó entonces con el modelo reducido de Hill. En él supone que el tercer cuerpo al ser muy pequeño no afecta en las órbitas de los otros dos y por eso puede predecirse su trayectoria, pero que estos dos sí afectan al más pequeño. Su asombro fue al ver que este tercer cuerpo seguía una trayectoria no periódica e impredecible que pareciera que no seguía ninguna ley. Gracias a este trabajo Poincaré fue acreedor de un premio que ofrecía el rey de Suecia a la persona que encontrara la solución del problema de los tres cuerpos. Más allá de responder a las preguntas del rey, Poincaré estaba planteando, sin saberlo, que era necesario crear un nuevo pensamiento matemático y una nueva ciencia para explicar la dinámica de los sistemas complejos. De esta visión casi profética nació muchos años después la ciencia del caos. El caos era el ente que gobernaba el comportamiento de los tres cuerpos: “Una causa muy pequeña que escapa a nuestra percepción determina efectos considerables que no pueden escapársele a nuestra vista, y entonces decimos que el efecto se debe al azar.” (Poincaré citado por De La Peña; 1996). El nacimiento de dicha ciencia no se dio inmediatamente, sin embargo la semilla estaba germinando.

Fué hasta los años 60 cuando el caos apareció como por arte de magia en el laboratorio de Edward Lorenz en el campus del Instituto de Tecnología en Massachusetts. Lorenz, meteorólogo de dicho instituto, tenía un nuevo juguete, una computadora que ocupaba toda su oficina y que generaba terribles ruidos mientras imprimía números que describían o simulaban la atmósfera de la tierra y los océanos. Probablemente Lorenz era el único meteorólogo que disfrutaba lo cambiante e impredecible del clima y que

apreciaba los patrones que aparecen y desaparecen en la atmósfera sin considerarlos obstáculos. Su meta era tratar de encontrar la relación entre los fenómenos climáticos y su formulación matemática.

Partiendo de la idea de que el clima podía simularse matemáticamente, creó un modelo de doce variables a partir de las teorías newtonianas. Con este modelo y la ayuda de su ruidosa computadora observaba patrones en primitivas gráficas que se reproducían continuamente pero sin seguir una trayectoria idéntica. La repetición nunca era exacta; existían patrones con perturbaciones, era un orden desordenado.

Fue gracias a una casualidad que Lorenz descubrió que su modelo debía ser modificado. En su aplicación al examinar una de las secuencias más detenidamente, tomó un atajo iniciando el sistema a la mitad, a partir de los números impresos en el papel. Lorenz salió de su oficina y después de una hora se encontró al regresar con algo inesperado: su clima divergía rápidamente de los patrones establecidos anteriormente. Al principio creyó que algo estaba funcionando mal, pero al desechar esa posibilidad vio que en realidad el problema había sido que al copiar los números de la secuencia había descartado tres números dígitos pensando que no tendrían ninguna trascendencia. Este mínimo error numérico causó cambios catastróficos en el modelo determinístico de Lorenz. A partir de este error fue claro para él que se trataba de un problema filosófico con respecto al comportamiento del clima y de su modelo y ello era lo que impedía un mayor entendimiento de su dinámica;

“una persona común, viendo que podemos predecir las mareas bastante bien con algunos meses de anticipación preguntaría por que no podemos hacer lo mismo con la atmósfera; es solamente un sistema de fluidos diferente, las leyes son casi tan complicadas. Pero yo me di cuenta que cualquier sistema físico que se comporta no periódicamente sería impredecible.” (Lorenz en Gleick; 1998).

Lorenz tuvo la intuición que le permitió interpretar adecuadamente la naturaleza del problema, y entonces seguir experimentando con transformaciones a su modelo, encontrando alternativas explicativas que no fueran descartadas como muchas veces ha pasado en la historia de la ciencia. El problema no eran las limitaciones tecnológicas ni la falta de conocimientos sino la manera en la que se concebía al sistema. A raíz de los cuestionamientos de Lorenz, y considerando que el clima no era el único fenómeno de este tipo en la naturaleza, se inició el camino para descubrir cuales son los mecanismos que gobiernan a los sistemas con comportamiento aperiódico y sensibles a las condiciones iniciales.

Ahora podemos definir al caos como un comportamiento irregular de un sistema dinámico que exhibe una gran sensibilidad a las condiciones iniciales y que si analizamos la trayectoria de un sistema caótico podemos ver complicadas formas que se mantienen en una sola región sin crecer ilimitadamente.

El surgimiento del estudio y la elaboración de las teorías del caos hasta nuestros días sigue gestándose, se han descubierto múltiples particularidades dentro de los sistemas que presentan comportamientos caóticos, una de las más importantes es que dentro del supuesto desorden que los caracteriza siempre existe un orden oculto, por lo que el caos difiere en gran manera de la aleatoriedad como tal. De esta forma la teoría del caos y la teoría de la complejidad tienen como labor estudiar fenómenos y procesos que emergen espontáneamente a partir del caos, y descubrir patrones y similitudes dentro de los sistemas integrantes de la complejidad.

Desde que el ser humano descubrió que la no linealidad es la esencia de la vida y que el caos es un fenómeno por medio del cual los sistemas evolucionan generando nuevas organizaciones y complejidades, trazó un camino por el cual acceder a una mayor comprensión de los fenómenos de la naturaleza incluyendo nuestra propia evolución y nuestro propio comportamiento.

La comprensión del caos y el uso de la complejidad debe ser una premisa en cualquier tipo de investigación. Para mí es una puerta que nos permite imaginar e intuir más profundamente los procesos constitutivos de la vida y por la cual podemos descubrir que la evolución del pensamiento humano todavía tiene mucho que plantear, que retomar, que repensar.

Capítulo 2

Sistemas dinámicos y desarrollo de las formas vivas

“Nada tiene sentido en la biología si no es a la luz de la evolución” Teodosius Dobzansky (1900-1995)

La organización viva y su gran variedad de formas es sin duda asombrosa, por esta razón ha sido de gran interés en la historia de la humanidad descubrir los secretos del surgimiento, desarrollo y evolución de las formas vivas. De hecho, podría formular todo un tratado sobre las teorías que se han elaborado a lo largo de la historia del pensamiento humano con el afán de resolver estos cuestionamientos, sin embargo dado que ese no es el objetivo de este trabajo, mencionaré sólo algunos de los casos.

Desde las primeras teorías en las que todo era explicado por la existencia de dioses, o de un dios como es el caso del cristianismo, hasta la actualidad en la que diversos enfoques luchan por llegar a la esencia de nuestra existencia y la de los demás seres vivos, una gran cantidad de sabios, estudiosos, magos, alquimistas, sacerdotes, científicos y demás, han dedicado su existencia a tratar de llegar a la clave del origen de la vida. Estamos frente a uno de los temas más controvertidos de la historia: la vida y su evolución.

A pesar de siglos de estudio en múltiples ramas del conocimiento, las preguntas claves acerca del desarrollo y organización de la vida no han sido resueltas, y esto en parte se ha debido a que la Biología necesita más que siglos para acercarse a la comprensión de los seres vivos; en muchos casos el reduccionismo dentro de las ciencias produce que se ignore la relación de las partes con el conjunto. Este reduccionismo es frecuentemente cuestionado en los textos donde se plantean los fenómenos relacionados con los sistemas complejos. El reduccionismo implica un tipo de investigación en la que se

busca la respuesta a los fenómenos naturales como si fueran simples efectos producidos por una causa. La interpretación de esta relación causa-efecto se da al aislar a los fenómenos sin considerar que son parte de un todo. Estos enfoques priorizan las respuestas por medio de la comprobación, pero desechando las partes que no pueden predecirse debido a que son parte de sistemas complejos. Ello evidentemente ha afectado el desarrollo dentro de la investigación en el área de la evolución. Una vez más nos enfrentamos a uno de los problemas de mayor reincidencia en la historia de la humanidad, explicar los fenómenos como procesos aislados.

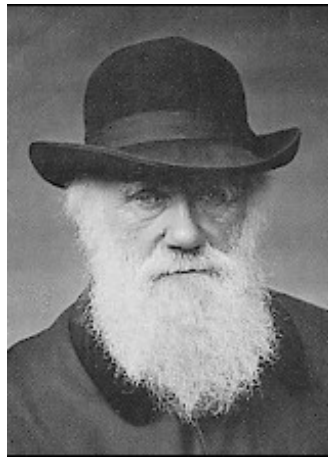


Figura 5. Charles Darwin 1880 (en www.wikipedia.org)

2.1. Antes y después de Darwin. Una analogía irónica

La descripción de la evolución de la vida en la tierra tomó un rumbo único a partir de que Charles Darwin (1809-1882) apareciera en la historia. Sus teorías acerca de la evolución permearon el pensamiento de su época y muchos años después se convirtió en la explicación oficial de la evolución de los seres vivos. La teoría de Darwin, a pesar de no explicar completamente la evolución como un complejo de interacciones entre surgimiento y desaparición de especies, generó más bases para cambiar la explicación de la aparición de la vida como obra del designio divino y esto fue, sin duda, un gran avance en la historia del pensamiento humano. Otro aspecto de importancia fue la consideración de que el *Homo sapiens* es una especie más y que además posee un gran parentesco con el mono. Ello fue un gran salto en la concepción del origen y presencia del ser humano en el mundo.

A pesar de este avance la concepción darwiniana es a mi parecer bastante antropocéntrica en la medida que considera al ser humano como la innovación más reciente y perfecta en la historia de la vida “la vida, gracias a la selección natural tenderá a progresar hacia la perfección. Somos la punta de la flecha del progreso, la expresión de la perfección” (Darwin en Leakey y Lewin 1998). Como es evidente en esta cita la teoría de Darwin del origen de las especies supone la existencia del progreso evolutivo y la idea de que los humanos somos la rama más alta en dicha “escala”, lo que podría implicar que al igual que en la religión en esta ciencia “Dios creó al hombre a su imagen y semejanza”.

Un componente central del planteamiento de Darwin es la selección natural que implica que los seres vivos compiten y sobreviven o mueren gracias a un examen en el que se determina si se es apto o no en la “lucha por la existencia”, es decir se es perdedor o ganador. Casi podría decir que los valores expresados por Darwin anticipan lo que posteriormente se traduciría en la ideología capitalista. .

No es de extrañar que Darwin utilizara o planteara en sus escritos relaciones lingüísticas o valores éticos para referirse a fenómenos relacionados con los seres vivos no humanos ya que en el mismo momento histórico en el que la biología proponía los medios teóricos para separarse del creacionismo ya existían modelos interpretativos de la conducta humana bastante sofisticados. Muchas veces pensadores como Darwin buscaban relaciones de comportamiento humano en el resto de los animales e incluso trabajaban en ambos campos. También hay que considerar que Darwin se formó en un país bajo el régimen victoriano en el que sin duda fue socializado para aceptar que el poder lo tenían los más fuertes, es decir, los colonizadores, los ingleses. Términos como DNA basura, Chaperoninas, egoísmo, altruísmo son pocos ejemplos de los términos del lenguaje utilizados en la biología moderna que provienen de la vida humana. Ello nos recuerda que muchas veces la curiosidad en la investigación de la vida se vincula con el interés de conocernos como especie.

A pesar de los cuestionamientos que pueden surgir a partir de las teorías de la evolución de Darwin fue muy importante la aceptación de que los seres vivos se adaptan a su medio ambiente. El planteamiento propuesto por Darwin es sin duda un enfoque que reconoce la complejidad de los procesos constitutivos de la naturaleza viviente, pero paradójicamente el desarrollo de este punto de partida fue paulatinamente abandonando esta visión compleja y sustituyendo la visión basada en el organismo como unidad primaria de vida, con enfoques en los que se ha llegado a concebir la realidad biológica como si se centrara sólo en los genes y sus productos, como “complejas

máquinas moleculares controladas por los genes que están contenidos en ellas y que son portadores de los registros históricos de las especies a las cuales el organismo pertenece” (Goodwin; 1994).

El estudio de los seres vivos a partir de los genes y sus productos no sería grave si se intenta comprender cómo estos elementos no son sólo entidades con vida propia, sino el resultado de múltiples interacciones. El reduccionismo que descarta la vinculación entre el individuo, su relación con la especie y el entorno (incluidas otras especies), representa una de las limitaciones que han reproducido muchos seguidores de Darwin quienes no consideraron el planteamiento complejo inherente en las teorías evolucionistas de esa época. Por ejemplo, la investigación en evolución o transformación de los seres vivos a través del tiempo fue primero utilizada por Lamarck (1744- 1829) y sin embargo el padre de la evolución es Darwin y de Lamarck sólo recordamos el paraje de las jirafas de cuello corto que tuvieron que evolucionar, creciéndoles el cuello para poder alcanzar su alimento en los árboles altos. El pensamiento de Lamarck va mucho más allá de esta anécdota, él ya percibía la complejidad de los fenómenos, como puede apreciarse en la siguiente cita:

¿No hemos en consecuencia percibido que por la acción de las leyes de la organización. . . la naturaleza ha multiplicado en tiempos favorables, lugares y climas sus primeros gérmenes de animalidad, dando lugar al desarrollo de sus organizaciones. . . e incrementado y diversificado sus órganos? Entonces . . . ayudada por mucho tiempo y por una lenta pero constante diversidad de circunstancias, ella ha gradualmente creado en este respecto el estado de cosas que ahora observamos. ¡Que enorme es esta consideración, y especialmente que tan remota es de aquellas que generalmente se ha pensado acerca de este tema!(en [www. ucmp. berkley. edu/ history/ lamark. html](http://www.ucmp.berkeley.edu/history/lamark.html))

Otro punto que quisiera mencionar como uno de las grandes limitaciones de la teoría de la evolución formulada por Darwin es el hecho de no considerar la presencia de extinciones a lo largo del proceso evolutivo de la vida. Para Darwin, la extinción era un proceso gradual y pasivo que no representaba algo significativo dentro de la evolución de las especies. La desaparición de las especies era solamente la desaparición de un linaje concreto, es decir, era un proceso individual, propio de cada especie y de causas muy diversas según el caso, por lo que era imposible formular una teoría de la extinción de manera paralela a la de la evolución. De hecho fue Georges Cuvier (1769- 1832), que realizó múltiples estudios paleontológicos, quien planteó a

la extinción como un fenómeno importante en el pasado de las formas vivas, “¿por qué nadie ha visto que los fósiles solos dieron nacimiento a una teoría acerca de la formación de la tierra, que sin ellos ninguno hubiera nunca soñado que hubo sucesivas épocas en la formación del globo?” (Cuvier en www.ucmp.berkeley.edu/history/cuvier.html).

Darwin no tomó en cuenta estos puntos y de hecho las teorías evolutivas fueron madurando con base en la idea de que la composición de la biota en la tierra era el resultado de la selección natural que actuaba sobre la herencia, y la creencia del progreso evolutivo que mencioné con anterioridad. Al integrar la teoría de la evolución con la genética en el siglo XX, entre los veinte y los treinta, en lo que ahora se conoce como neodarwinismo, el estudio de la evolución se ha basado en la influencia de las frecuencias génicas y genotípicas en la selección natural, continuando con el mismo marco teórico propuesto por Darwin, como evolución progresiva y lineal.

Fue hasta 1981 cuando se descubrió un estrato enriquecido en iridio en el límite Cretácico- Terciario, que la ciencia sufrió una gran conmoción al plantearse que podían haber existido períodos cíclicos de catástrofes naturales que generaron grandes extinciones. Las predicciones de los paleontólogos incluido Cuvier, estaban siendo escuchadas. La evolución de la vida dejó de concebirse como un proceso lineal de perfeccionamiento y por el contrario se planteó como, largos periodos de estabilidad seguidos por grandes reorganizaciones globales. En ese momento la concepción de la evolución sufrió un giro muy importante, es decir, se planteó como un sistema complejo.

Los seres vivos no participan solos en el desarrollo del proceso evolutivo y esto incluye a las grandes extinciones. Todos trabajamos en conjunto gracias a un proceso llamado conectividad en el cual no sólo somos la suma de las partes, no somos seres independientes, por lo tanto ni evolucionamos solos ni nos extinguimos solos. Esto explica, en parte, que se hayan dado a lo largo de la historia del globo grandes extinciones en masa y subsiguientes avalanchas de especiación.

Como podemos ver, muchas veces la biología perdió en el camino, en algún lugar de la historia, la capacidad de entender a los organismos vivos como entidades dinámicas con una gran capacidad de organización y orden característicos, en los que interactúan diversos fenómenos inseparables unos de otros. No podemos reducir la explicación de la vida, ni al absolutismo molecular (que sin duda es de gran importancia en el mantenimiento de la misma); ni a la selección natural, ni al azar, que como concebía Darwin era una suerte de entidad divina que generaba toda la variedad de formas vivas sobre la tierra. La ciencia ha abordado infinidad de veces estos puntos y sin embargo no se ha entendido cabalmente la verdadera dinámica de las formas

vivas. Si esta dinámica fuera reducible a unos cuantos puntos, el problema ya hubiera sido resuelto, pero aún no hemos cantado victoria.

La pregunta que surge es, por qué la ciencia lineal dominante descarta partes fundamentales de las teorías e incluso los mismos autores no las desarrollan y se desvían a causa de la convergencia con ideas externas, racionales y con una lógica lineal. La respuesta a estos planteamientos puede encontrarse a partir de un pensamiento complejo, el cual no se ha desarrollado hasta sus últimas consecuencias debido al peso que ejerce la ciencia lineal considerada como la legítima. Es decir, tanto el éxito de las teorías alternativas, como la explicación de sus dificultades deberá descansar en la ruptura del pensamiento lineal.

Las nuevas teorías de la complejidad y el caos, han abierto un nuevo rumbo por el cual acceder a respuestas que nos aproximan a la realidad de la evolución de la vida, adentrándose en los orígenes del orden y la emergencia de las formas de vida. La explicación del proceso evolutivo ha dejado de verse sólo como un camino competitivo de sobrevivencia y egoísmo, como lo planteó Darwin y sus seguidores, incluso a nivel del comportamiento genético (véase Dawkins 1993).

La evolución de la vida se debería plantear como un fenómeno complejo en el que todas las partes interactúan por el bien del funcionamiento global, a veces en competencia y otras en colaboración. Esto ha sido planteado entre otros, por Peter Kropotkin en su libro "Mutual aid. A factor of evolution". El afirma que en la naturaleza existe tanto una inmensa guerra y exterminación entre varias clases de organismos, pero al mismo tiempo soporte mutuo, ayuda mutua y defensa mutua entre individuos de la misma especie o de la misma sociedad; la sociabilidad es parte de las leyes de la naturaleza tanto como la lucha mutua. Según este autor, los hábitos de ayuda mutua generan una mayor capacidad de sobrevivir, un alto desarrollo de la inteligencia y de la organización corporal.

Lynn Margulis retoma este tipo de enfoque en su teoría de la endosimbiosis en la que propone que a partir de una relación de cooperación o simbiosis se desarrolló la célula con mitocondrias y cloroplastos, como paso fundamental para el desarrollo de las formas vivas que ahora pueblan la tierra (Margulis; 1998). La concepción en la que la vida implica no sólo la lucha por la sobrevivencia, probablemente es más cercana a la complejidad que se presenta en la relación entre las especies que conforman el mundo vivo. La diversidad de relaciones y dinámicas que se dan entre los seres vivos no puede reducirse a un solo planteamiento, la lucha por la sobrevivencia es por lo tanto una explicación parcial.

El estudio de la complejidad trata de construir teorías sobre los proce-

Los dinámicos en los organismos como base para comprender las propiedades emergentes de la vida y sus manifestaciones en la evolución. Dichas propiedades son generadas durante el proceso de morfogénesis, entendido como el desarrollo de formas complejas a partir de un huevo, o un simple brote, hasta formar un organismo adulto. Durante la morfogénesis el orden emergente es generado por tipos distintivos de procesos dinámicos en los cuales los genes juegan un papel muy importante pero limitado. La morfogénesis es dentro de este enfoque la fuente en la que emergen propiedades evolutivas.

En este trabajo la morfogénesis ocupa un lugar central como el motor de mis planteamientos sobre el proceso evolutivo, y en este punto quisiera seguir con un poco de historia.

Como ya se ha mencionado, las ideas acerca de lo complejo han aparecido en momentos históricos distintos y muchas veces no han sido escuchadas debido al predominio de otras corrientes de pensamiento en su época. Sin embargo, al plantearse nuevas teorías y enfoques filosóficos distintos a los establecidos por siglos, se retoman ideas y cuestionamientos de pensadores que de alguna manera no se acoplaban a dichas corrientes establecidas. Ellos pueden considerarse como disidentes; desde mi perspectiva como pioneros y desde el punto de vista opuesto como “herejes”.

Dentro de la biología, el predominio de las ideas de Darwin desviaron la atención de algunos pensadores, y entonces la historia se dividió en antes y después de Darwin. Ante la imposibilidad de llegar a respuestas completamente satisfactorias con respecto a la evolución y la comprensión de la vida, y en consecuencia de formular una nueva visión acerca de los fenómenos, surgen los enfoques de la complejidad y se rescatan “pedazos” que se habían perdido en la historia.

Este trabajo se hace un intento por unir algunas partes desmembradas y hablar un poco de estos pensadores enterrados en el olvido en la historia de la Biología. Principalmente retomaré los planteamientos de D’Arcy Thompson y Geoffroy Saint-Hilaire, quienes encajan en el interés por descubrir en la morfología el motor del proceso dinámico de la evolución.

2.2. Etienne Geoffroy Saint- Hilaire y la búsqueda de la unidad en la composición

Geoffroy St. Hilaire nació el 15 de abril de 1772 en Étampes cerca de París, Francia. Su vida fue un poco tormentosa empezando por que le tocó vivir la Revolución Francesa y por la existencia de Georges Cuvier, importante naturalista representante de las corrientes científicas consideradas

legítimas en su tiempo. Con Cuvier estableció un famoso debate en el que cada uno manifestó sus diferentes posiciones en competencia (Appel; 1987).



ET GEOFFROY S. HILAIRE,
(Né à Angoulême),
Membre de l'Académie des Sciences,
Dit à l'Empire (L'ouvrier) le 8 Avril 1804.

Figura 6. Geoffroy Saint Hilaire 1772-1844

En 1790 recibió su grado en leyes y continuó sus estudios en medicina y ciencias en París en el colegio du Cardinal Lemoine. En esta época casi pierde la cabeza por salvar las de sus colegas de la guillotina. Mientras esto sucedía fue profesor de zoología de vertebrados en el Jardin des Plantes el cual posteriormente, con el gobierno revolucionario, se convertiría en el Musée National d' Histoire Naturelle. En 1794 con la recomendación de Henri Alexandre Tessier invitó a Georges Cuvier para trabajar con él en París. Esta relación representó un aspecto muy importante en la vida de Geoffroy y en el desarrollo de su trabajo.

En 1798 participa en la invasión de Napoleón a Egipto y a su regreso trae consigo muchos especímenes animales, como aves y gatos, momificados para su estudio y descripción. La inclusión de estos animales provenientes de tiempos remotos sirvieron para que Cuvier argumentara que eran la prueba de que la evolución no pudo haber ocurrido ya que comparándolos con las especies actuales no presentaban ninguna diferencia. Esta posición extrema se ajustaba perfectamente al poder que en su momento ejercía la iglesia y sus dogmas como principal verdad científica.

En 1807 Geoffroy fue nombrado miembro de la Academia de las Ciencias y en 1809 fue profesor de zoología en la Universidad de París. Antes de su muerte en junio de 1844 su hijo Isidore tomó su puesto en dicha universidad y llegó a ser un prominente zoólogo y embriólogo, siguiendo la misma línea de su padre, aunque de una manera menos radical.

Dentro de la historia tradicional de la embriología Geoffroy ha tenido un papel que ha sido menospreciado. Se dedican incluso secciones en algunos libros, como es el caso del trabajo de Browder sobre la biología del desarrollo, para hablar de él como un precientífico que “trató de resolver ciertas cuestiones anatómicas”, pero no es considerado como un embriólogo respetable. No obstante a veces sí plantean un poco de lo que hizo a nivel experimental, aclarando que su practica puede considerarse como anatomía del embrión pero no propiamente como embriología. Este autor concluye, “Saint Hilaire esperaba mucho de sus experimentos y no nos sorprendería si hubiera encontrado un reptil en uno de sus huevos experimentales . . . para llamar al trabajo de Saint Hilaire científico se invita a una paradoja” (Browder; 1991).

Como podemos ver la historia que ignora los intentos de entender los procesos complejos en el desarrollo de la vida se repite y se repite en la biología, por eso me interesa destacar la importancia de los trabajos de los disidentes; quienes como en el caso de Saint Hilaire nos ofrecen nuevas respuestas desde una perspectiva que fue descartada por las corrientes científicas predominantes. Como ya he mencionado el germen de la complejidad ha estado presente y luchando por ocupar un lugar importante en la historia de la ciencia. En este sentido me interesa rescatar algunos de los planteamientos de Geoffroy.

Una de las pregunta clave en el pensamiento de Geoffroy y quizá una de las mayores controversias de la primera mitad del siglo XIX es la siguiente, es la función el resultado mecánico de la forma o es la forma la manifestación de la función. La respuesta a esta pregunta es fundamental para entender cuál es la esencia de la vida, su organización o actividad.

Al tiempo en que Cuvier fundó la escuela “funcionalista” de la biología organísmica, con la teoría de que los animales son unidades integradas funcionalmente inmutables y estáticas, Geoffroy continúa con una tradición más formalista en la biología, tradición que empezó con Bufon y fue continuada por Goethe, Lamarck y otros. En su libro *Philosophie anatomique*, publicado en 1818, Geoffroy plantea la pregunta, puede la organización de los animales vertebrados ser referida a un tipo uniforme. Su respuesta fue sí. Geoffroy veía a todos los vertebrados como modificaciones de un único arquetipo, de una forma única.

A partir de sus observaciones en diferentes animales vertebrados consideró que la presencia de órganos vestigiales y las fuerzas embriónicas de transformación no tenían un propósito funcional sino que indicaban el camino en común de cada animal y su arquetipo. Geoffroy plantea que los animales son el resultado de la estructura de sus órganos y existe una correlación de las partes. Si existen variaciones posteriores todas las partes tienen que cambiar

de la misma manera, incluido en estas transformaciones cuestiones que van más allá de aspectos morfológicos, como por ejemplo en el comportamiento y las facultades. Es decir, Geoffroy consideraba al organismo como un proceso dinámico en el cual se generaban las transformaciones produciendo cascadas de modificaciones. Él rechaza el hecho de que, como planteaba Lamarck, se diera un cambio gradual; las partes no pueden ser modificadas y conservarse casi intactas en el organismo y posteriormente con el tiempo verse los cambios.

Geoffroy pasó mucho tiempo de su vida tratando de escribir reglas para describir cuando las estructuras de dos organismos diferentes eran variantes del mismo tipo, en términos modernos, cuando eran homólogos. Geoffroy plantea una gran cantidad de ejemplos acerca de dichas homologías, buscando una unidad. De hecho se ha considerado, dentro de las corrientes dominantes, que las comparaciones que realizó pretendían mucho más de lo que él podía demostrar. Una de sus teorías más extremas fue aquella en la que compara al esqueleto segmentado externo y las patas articuladas de los artrópodos, concluyendo que eran equivalentes a las vértebras y costillas de los vertebrados. Literalmente, para él, los insectos viven dentro de los vertebrados creando un único animal.

Las transformaciones según las teorías de Saint- Hilaire eran producidas por restricciones fisicoquímicas del medio ambiente en el que se desarrollan los organismos, al darse un cambio éste es transmitido a su descendencia no como se plantea en la teoría de la selección natural de un modo azaroso, sino gracias a un proceso adaptativo. Según su planteamiento:

El mundo externo es todopoderoso en la alteración de la forma de los cuerpos organizados... estas [modificaciones] se heredan e influyen todo el resto de la organización del animal, porque si produce efectos dañinos, los animales que las exhiban perecen y son reemplazados por otros de alguna forma diferente, una forma que ha cambiado hasta adaptarse al nuevo ambiente. (Saint-Hilaire en Miramontes y Gutiérrez; 1996).

La estructura es entonces la que determina la función y actúa en el proceso adaptativo. Las transformaciones obligan a cambiar por completo para poder así mantener a la estructura.

2.3. El debate entre Geoffroy y Cuvier

El problema entre Geoffroy y Cuvier surge cuando en 1830 dos jóvenes científicos, Meyranx y Laurencet presentan una comparación entre la anatomía de los vertebrados y los cefalópodos (pulpos, calamares y nautilus), aseverando que ambos tenían un plan estructural común. Dada la coincidencia con los planteamientos de Geoffroy éste respondió muy entusiastamente y lo tomó como la comprobación de que todos los animales poseen la misma unidad estructural. Cuvier reaccionó en contra y descartó la validez de sus conclusiones acusando a Geoffroy de que muchos de sus ejemplos no eran exactos y precisos y que las similitudes entre cefalópodos y vertebrados habían sido fabricadas por él y eran superficiales. En el fondo, su rechazo a las teorías de Geoffroy partían de una diferencia fundamental entre ambos con respecto a la aceptación del dogma religioso en el que no había la necesidad de otra explicación que la existencia de un creador de todas las cosas. Según Cuvier:

de hecho, si recurrimos al Autor de todas las cosas, ¿qué otra ley pudiera hacerlo actuar sino la necesidad de proveer a cada ser cuya existencia depende para su continuidad de los medios que le aseguren su existencia? Y por qué Él no varía sus materiales y sus instrumentos? Ciertas leyes de coexistencia de los órganos fueron por lo tanto necesarias, pero eso fue todo. Para poder establecer otros debió haber habido un deseo de libertad en la acción del principio organizador, que hemos mostrado ser sólo una quimera (Cuvier en Appel 1987).

Entre estos dos planteamientos extremos fue que se generó uno de los debates más famosos en la historia de la biología.

El debate de Geoffroy y Cuvier fue como en muchos otros momentos en la historia de la ciencia el resultado del desacuerdo de ideas, y del mismo modo que se han generado momentos en los que las disciplinas se frenan y cambian las concepciones tomadas hasta ese momento, este debate representó un punto importante en el que se pusieron en juego fuerzas múltiples, que más allá de la capacidad científica de las teorías en cuestión determinaron el predominio de unas ideas y el rechazo de otras. El debate de Geoffroy y Cuvier plantea una división fundamental en la biología: la estructura animal puede ser explicada con referencia a la función o por el contrario por las leyes morfológicas a las cuales se ajusta la función.

El resultado del debate fue influido por cuestiones políticas y sociales en las que Cuvier era beneficiado. Fue un debate científico en el que, como

muchas veces ha pasado en la historia, el punto decisivo fue estar o no del lado de la clase en el poder, (muchas veces concientemente y otras sólo como una coincidencia). Esta posición ha sido muchas veces determinante para que ciertas teorías sean bien aceptadas, aunque vayan por caminos muchas veces incorrectos.

Cuvier planteaba que los organismos vivos no se transformaban sino que tal como habían sido creados por Dios así se quedarían y que cualquier desequilibrio en el orden establecido produciría la desaparición de dicho organismo. En este momento escuchar esta formulación nos puede parecer difícil de creer y sin embargo en ese tiempo, con estas interpretaciones, se “promulgó” a Cuvier como ganador del debate en contra de las teorías de Geoffroy. Sin embargo es importante rescatar la importancia que tiene Cuvier dentro de la biología, si bien planteaba teorías un tanto estáticas acerca del origen de la vida y en las que la evolución no tenía cabida, es considerado como uno de los más grandes historiadores naturales del siglo XIX y el que sentó las bases de la geología moderna.

La historia que narra los pormenores del debate entre Geoffroy y Cuvier es interesante, sobre todo por lo complejo del marco histórico y social en el que se desarrolló (Appel; 1987). Francia estaba en una etapa de grandes reestructuraciones y la ciencia tenía un papel muy importante, se planteaban las líneas que tenía que seguir la academia a partir de una nación en caos. El debate además de ser una discusión entre dos científicos era parte de las maniobras entre distintos bandos de poder, la iglesia con sus dogmas defendidos por Cuvier y ciertos grupos con ideas revolucionarias que de alguna manera coincidían con los planteamientos de Geoffroy.

La academia no estuvo de acuerdo con que se llevara a cabo el debate y mucho menos que se le considerara el juez que decidiera quién perdería o ganaría, así que se mantuvo al margen. Es probable que esta actitud generara el mito de que Cuvier había sido el ganador del debate. El hecho de que la academia no diera un veredicto a una discusión que en realidad no tuvo fin, permitió que se hablara del triunfo de Cuvier, probablemente como una manera de desprestigiar a la misma academia la cual estaba entre la espada y la pared debido a la situación política.

Las teorías de Saint- Hilaire tuvieron auge en otros lugares de Europa; de hecho el debate permitió que sus teorías fueran conocidas por varios sectores científicos y no científicos gracias a la polémica que se generó por el hecho de ser un debate público. Independientemente de perdedores y ganadores el debate de Cuvier y Geoffroy trajo consigo un cambio de ideología en la resolución de problemas en la biología, transformando la visión naturalista por una investigación más creativa en la que no sólo se observaba y describía

la naturaleza sino que se elaboraban teorías mas elaboradas para explicar los fenómenos vivos, incluida la discusión acerca de la evolución. El hecho de que se diera el debate y que las teorías de Geoffroy tuvieran una trascendencia, dio inicio a un proceso único en la historia de la biología, el surgimiento de Darwin, quien retoma todas estas discusiones para elaborar su teoría acerca de la evolución. Darwin se convierte en el padre de la evolución sin dar un verdadero crédito a los primeros pensadores, a las primeras semillas que dieron origen al pensamiento evolutivo. En cierto modo se presenta a sí mismo como si sus teorías se hubieran generado espontáneamente. Que extraño que el padre de la evolución no considerara dentro de sus teorías a la evolución del pensamiento humano de gran importancia para comprender las fuerzas que generan la evolución de las mentes individuales.

Lo más importante de todo esto es que a lo largo de la historia la discusión acerca de los fenómenos involucrados en el desarrollo de las formas vivas ha tenido un lugar muy importante en el pensamiento de muchos científicos y sigue generando puntos de discusión y enfrentamiento entre distintas concepciones y enfoques. La perspectiva científica lineal se ha topado con planteamientos distintos con nuevas vertientes que superan las explicaciones que anteriormente se postulaban pero que ha considerado como inválidos e innecesarios ya que da por hecho que sus alcances son suficientes para las posibilidades de comprensión de los fenómenos vivos. Es decir, definieron límites en función de sus propias limitaciones y en consecuencia se topó con su peor pesadilla, la complejidad.

Capítulo 3

Los disidentes



Figura 7. *Escarabajo*. Albrecht Dürer, 1505. J. Paul Getty Museum Los Angeles, California, 1999.

3.1. El arquetipo resultó ser real y el escarabajo lucha en nuestro interior

Durante este lapso de mi vida, en el que de manera fascinante he descubierto nuevos planteamientos y enfoques acerca de la complejidad de la vida y que he intentado presentar en este trabajo, tuve en mis manos un libro donde aparece un capítulo clave. Se trata del trabajo *Brotherhood by inversion (or, As the worm turns)* escrito por Stephen Jay Gould en el libro *Leonardo's Mountain of Clams and the Diet of Worms*. En él Jay Gould muestra que las ideas acerca de la similitud que existe entre grupos animales

muy diferentes (aparentemente) es real. A partir de su trabajo podemos apreciar el valor de las propuestas de Geoffroy más allá de considerarlas una mera curiosidad y valorar su insistencia por encontrar los patrones estructurales. En la actualidad sus planteamientos empiezan a ser retomados y gracias a nuevos avances metodológicos y experimentales se han descubierto relaciones entre diferentes organismos no sólo a nivel morfológico sino también a nivel molecular y genético, e incluso se han encontrado patrones comunes de desarrollo embrionario que han llegado a ser muy significativos sugiriendo relaciones filogenéticas, estableciendo una manera completamente diferente de analizar a los seres vivos y a sus relaciones evolutivas.

En su libro Jay Gould muestra el planteamiento o teoría de Walter Gaskell, fisiólogo inglés (1847-1914), acerca de la relación entre los artrópodos y los vertebrados, como ya lo había hecho Geoffroy, pero de manera un poco diferente. Él argumenta que la vida animal evolucionó a partir de una línea progresiva con avances mediados por el incremento en la elaboración del cerebro y el sistema nervioso. En su trabajo *The Origin of Vertebrates* (1908) afirma:

Nosotros podemos trazar sin un rompimiento, siempre siguiendo la misma ley, la evolución del mamífero a partir del reptil, del reptil a partir del anfibio, del anfibio a partir del pez, del pez a partir del artrópodo [insectos y sus aliados], los artrópodos a partir de los anélidos [gusanos segmentados], y podemos ser confiados en que las mismas leyes pueden permitirnos ordenar en secuencia a todos los grupos del reino animal (Gaskell en Gould; 1998).

Gaskell llama a este principio lineal de control, “ley superior de la importancia del desarrollo del sistema nervioso central por todo progreso hacia arriba” y se distingue de los planteamientos de Geoffroy en que éste plantea la existencia de un plan común del que surgen diversos arquetipos a partir de transformaciones que resultan en diferentes morfologías en los grupos animales. La idea del control lineal en cambio articula todos los organismos en una sola progresión. Según Gaskell:

Esta consideración apunta directamente al origen de los vertebrados a partir de los grupos invertebrados más altamente organizados- los Artrópodos- entre todos los grupos animales vivientes en la tierra en el presente ellos son los únicos que poseen un sistema nervioso central muy cercano en diseño con el de los vertebrados (Gaskell en Gould; 1998).

Las teorías de Gaskell podrían parecer extremas, sin embargo los artrópodos y los vertebrados tienen ciertas características en la organización general, como el cuerpo alargado, simetría bilateral con órganos sensoriales en el frente, estructuras excretoras en la parte posterior y un tipo de segmentación a lo largo del eje mayor que son comunes a grupos aparentemente muy distantes. El problema de la búsqueda de la relación entre estos dos grupos surge cuando se analiza la organización de los órganos internos. Los artrópodos concentran el sistema nervioso en la parte ventral en donde corren los dos cordones principales en la superficie de la “panza” del animal; la boca abre en la parte ventral con el esófago pasando entre los dos cordones nerviosos, y el estómago y el tubo digestivo corre por encima de los cordones nerviosos. En el caso de los vertebrados en cambio, el sistema nervioso central se sitúa a lo largo de la parte dorsal formado por un tubo sencillo que finaliza en un bulbo cerebral en la parte frontal y el aparato digestivo se desarrolla abajo del cordón nervioso. Existe además otro tipo de inversión presente entre estos dos grupos en sentido anteroposterior: los invertebrados son protostomados, es decir el blastoporo origina a la boca y los vertebrados son deuterostomados, el blastoporo origina al ano. Analizando estos puntos podemos ver que con sólo invertir el arreglo de un insecto se observa la composición orgánica de un vertebrado.

En este punto podemos retomar la propuesta de la teoría de la inversión de Geoffroy Saint-Hilaire la cual ha tenido un lugar muy importante en las discusiones acerca de la evolución de los vertebrados y representa un punto fundamental para complementar las teorías que apoyan el desarrollo de las formas a partir de bloques arquetípicos causantes de la diversidad morfológica. En nuestros días esta propuesta puede ser considerada como producto de leyes racionales de transformación, sin embargo el pensar que los grupos animales surgieron de manera lineal a partir de otro organismo es un poco contradictorio con los planteamientos de este trabajo.

La vida con toda su complejidad se ha desarrollado generando una adaptación global incluyendo el todo con sus partes. La misma adaptación ha generado patrones de formas o arquetipos como podríamos llamarles, para habitar el mismo mundo con toda su materia. Los parecidos son enormes ya que seguimos las mismas leyes, nos alimentamos de la misma “magia”.

Geoffroy de alguna manera tenía razón. Quizá las explicaciones no eran las más indicadas, o sus recursos para mostrarlo eran insuficientes pero su pensamiento teórico estaba correcto tal como ha sido mostrado al adentrarnos en el mundo de los genes. Ahora podemos saber con cierta facilidad que los vertebrados y los artrópodos están separados evolutivamente por 500 millones de años pero con un extenso número de genes similares que estruc-

turan a ambos grupos. Es decir, las entrañas moleculares de los vertebrados y los artrópodos se relacionan por mucho; existen unidades estructurales innegables para los ojos de la ciencia moderna. Los seres vivos no evolucionan en línea recta uno tras otro cual fábrica de galletas, sino algo más parecido a un manglar en el que no existen relaciones jerárquicas, ni de inferioridad ni de escala; funcionan bajo las mismas leyes frente a una dinámica compleja.

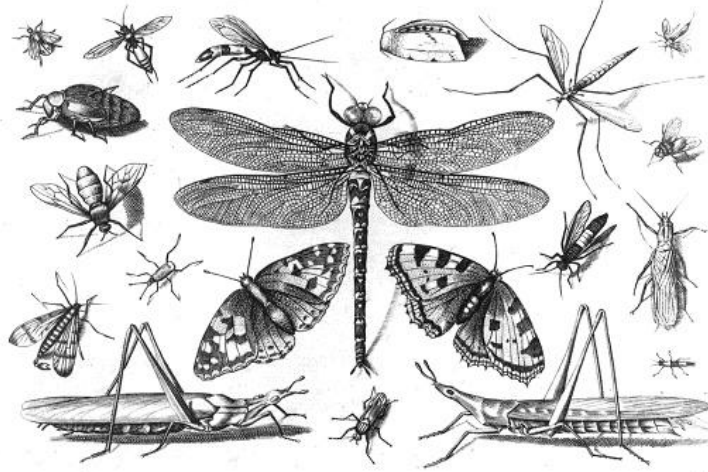


Figura 8. *Libélulas, grillos e insectos*. Jacob Hoefnagel, 1630. J. Paul Getty Museum Los Angeles, California, 1999.

Las relaciones genéticas de diversos grupos animales han sido analizadas asombrosamente desde la visión de la biología del desarrollo en donde se describen secuencias casi iguales entre grupos de genes encargados del desarrollo durante la vida embrionaria llamadas cajas homeóticas. De aquí se desprende la importancia de la embriología y la evolución como partes integradas e inseparables. Se ha propuesto que el hecho de que existan estas cajas de genes encargados del desarrollo en grupos animales distintos es el resultado de la convergencia, es decir que con base en diferentes puntos se desarrollan soluciones evolutivas iguales. Sin embargo esto parece ser erróneo, las cajas homeóticas son el resultado de la conservación a lo largo de la evolución de patrones de desarrollo presentes en una gran diversidad de formas aparentemente muy distantes, “ los vertebrados son en cierto sentido, verdaderos hermanos (u homólogos)- y no solamente análogos- de los gusanos y los insectos” (Gould; 1998).

Un ejemplo que ha apoyado el hecho de que las estructuras no se desarrollan por una simple convergencia y una solución a una necesidad a partir de diferentes materiales como es el ejemplo del ojo, anatómicamente muy

diferente entre vertebrados, moluscos y artrópodos, es la presencia de un gen llamado pax- 6 que participa en el desarrollo embrionario del ojo en los tres grupos. De aquí se puede desprender que existe un ancestro común entre estos tres grupos y que dicho gen llegó para quedarse.

Un suceso muy importante dentro de esta discusión es el descubrimiento de Eddy De Robertis de la UCLA y de Ethan Bier de la universidad de California San Diego, con el cual la idea de Geoffroy y la teoría de la inversión de artrópodos y vertebrados parece ser reivindicada. Todo comenzó con la secuenciación del gen de los vertebrados llamado chordin. Dicho gen codifica a una proteína que induce el desarrollo de la parte dorsal del embrión en desarrollo y juega un papel muy importante en la formación del cordón nervioso dorsal. Cuando estos investigadores buscaron el gen correspondiente en *Drosophila* descubrieron que chordin tiene una gran similitud con sog, pero éste se expresa en la parte ventral de la larva de *Drosophila* donde actúa en el desarrollo del cordón nervioso ventral. Es decir, el mismo gen desarrolla el sistema nervioso en los dos grupos pero de manera invertida, y por lo tanto Geoffroy estaba en lo correcto. La panza de los insectos corresponde a nuestra espalda y viceversa. La teoría de la inversión ha sido comprobada no en el mismo sentido que le había dado Saint- Hilaire pero podemos pensar que era un tipo muy intuitivo. La importancia de la morfología y su desarrollo en la dinámica de la vida es retomada hasta hace algunos años y es hasta este momento en el que podemos rescatar las ideas de los precursores científicos, cuyos estudios no fueron plenamente reconocidos en su tiempo, probablemente por la falta de herramientas y fundamentos ahora mejor comprendidos acerca del funcionamiento de los seres vivos.

A continuación hablaré de uno de los hombres mas importantes en el desarrollo de las teorías relacionadas con el problema de las formas vivas, quien gracias al surgimiento de nuevas teorías con base en enfoques dentro de la complejidad ha sido estudiado y retomado en múltiples trabajos acerca de la solución de cuestiones morfológicas y la utilización de las matemáticas como herramienta en el estudio de los seres vivos, él es D'Arcy Thompson, quien es sin duda fundamental en mis planteamientos.

3.2. D'Arcy Wentworth Thompson y el otro secreto de la vida

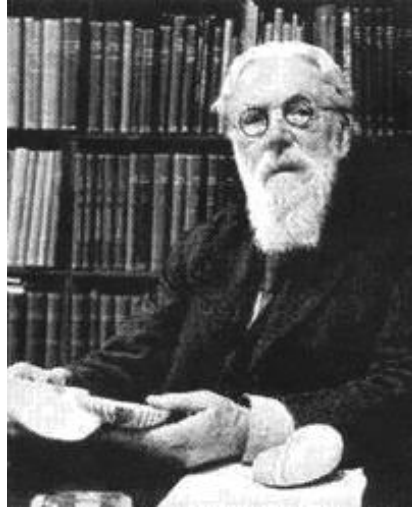


Figura 9. D'Arcy Thompson 1860-1861(en www.wikipedia.org)

Alrededor de la mitad del siglo veinte las respuestas del origen de la vida no eran muy claras. El descubrimiento de la estructura molecular del DNA surgió como una manera de responder estos misterios. La vida era planteada como un tipo de química expresado en un complejo código molecular, una especie de libro en donde se escribía el secreto de la vida, las formas, el desarrollo y el comportamiento. Este descubrimiento fue de gran importancia en la historia de la ciencia; abrió caminos muy diferentes acerca de la visión del mundo vivo... caminos que eran limitados.

El entendimiento de la vida no podía ser visto sólo como una serie de claves ordenadas, los científicos contemporáneos se dieron cuenta que los seres vivos se comportaban de manera desordenada. Se habían olvidado de que la vida es más que el resultado de los genes, y que se requería para entender su funcionamiento de las mismas leyes físicas complejas moduladas por matemáticas muy sofisticadas. Fue entonces cuando el estudio de las matemáticas empezó a tomar un lugar muy importante en la investigación de los fenómenos involucrados en el surgimiento de la vida. Ian Stewart en su libro *Life's Other Secret* llama a las matemáticas "el otro secreto de la vida", y considera que sin las herramientas matemáticas nunca llegaremos a comprender sus misterios. Así, para comprender la vida es fundamental tomar en cuenta el papel que desempeñan los genes y las matemáticas. La conjunción de estos dos aspectos no ha sido ampliamente considerada

por las corrientes principales de la ciencia, y han sido más bien los científicos disidentes quienes desde mucho antes han explorado creativamente esta relación para poder responder a preguntas que la ciencia predominante no ha podido resolver. Uno de estos grandes disidentes fue un zoólogo formado en la tradición de las matemáticas, D'Arcy Wentwort Thompson.

Thompson nació el 2 de Mayo de 1860 en Edimburgo Escocia. Su padre fue nombrado profesor de griego en el Queen's College cuando el tenía sólo tres años de edad y el hecho de que su padre fuera un estudioso del griego lo influyó para que se convirtiera en un destacado investigador de los filósofos de la Grecia clásica. Esta formación fue de gran importancia en su trabajo, basado principalmente en los estudios de Aristóteles. De hecho fue él quien hizo una traducción completa del libro *Historia Animalium*, escrito por Aristóteles sobre historia natural y escribió un glosario de aves griegas en 1895. D'Arcy es considerado como un gran matemático, naturalista y un experto en la cultura griega.

Sus primeros estudios profesionales en zoología finalizaron en 1883 pero su doctorado lo obtuvo en 1923, 29 años después. En 1884 fue nombrado profesor de biología en Dundee (incorporado como parte de la universidad de St Andrews en 1897) y posteriormente nombrado titular de historia natural donde permaneció por 64 años, un record que hasta la fecha nadie ha roto. En realidad Thompson fue el primer biomatemático en la historia de la ciencia. Su comprensión de las matemáticas estuvo basada en los firmes fundamentos de las matemáticas griegas, pero él incorporó dicho conocimiento enfocándolo a un acercamiento científico más moderno.

D'Arcy Thompson escribió alrededor de 300 artículos y libros científicos los cuales recopiló en su famoso libro *On Growth and Form* (1917). En este libro él intenta comprender al fenómeno biológico con base en estructuras matemáticas. Formula que todos los animales y plantas pueden ser entendidos en términos de los fundamentos de la matemática pura. De hecho considera que todos los fenómenos naturales siguen los mismos principios y leyes.

Las olas del mar, las pequeñas ondulaciones en las costas, las vastas curvas de las bahías arenosas entre las tierras vírgenes, la línea de las colinas, las formas de las nubes; todos estos son muchos de los enigmas de las formas, muchos de los problemas de la morfología y en todos ellos el físico puede leer más o menos fácilmente y resolver adecuadamente... No es de otra manera con las formas materiales de las cosas vivientes. Célula y tejido, concha y hueso, hoja y flor son muchas porciones de materia, y

es en obediencia a estas leyes de la física que sus partículas se han movido, moldeado y conformado. (Thompson; 1992).

En *On Growth and Form* podemos ver que Thompson deja a un lado el uso de la observación y la descripción como únicas herramientas para el análisis de los seres vivos. Cambia la tradición naturalista, se adentra en la investigación y el desciframiento y busca el sentido y las causas del desarrollo de las formas en la naturaleza. Para llegar a la comprensión de estos fenómenos utilizó como principal fundamento a las matemáticas. Sin lugar a dudas su trabajo podría haber cambiado la visión del pensamiento biológico abriendo un camino muy importante, la aplicación de las matemáticas para explicar fenómenos biológicos. Estos caminos, si bien estaban disponibles para la ciencia de su tiempo no fueron considerados por muchos de los biólogos. Es hasta muy recientemente que se han retomado sus planteamientos y se ha considerado la existencia de patrones generales con base en los cuales se moldean las formas y estructuras de los seres vivos.

Por una u otra razón, hay muchas formas orgánicas que no podemos describir ni, aún menos, definir en términos matemáticos: exactamente del mismo modo en que hay problemas de la física que están más allá de la matemática de nuestro tiempo. Ni siquiera buscamos una fórmula para definir éste o aquel pez ni éste o aquel cráneo; pero ya podemos hacer uso del lenguaje de la matemática para describir y hasta definir la forma de la concha de un caracol, la torsión de un cuerno, el contorno de una hoja, la textura de un hueso, el tejido de un esqueleto, las líneas de flujo en los pájaros y los peces o el fantástico encaje de las alas de un insecto. Para hacer esto, debemos aprender del matemático a eliminar y descartar, a guardar en la mente el tipo y dejar de lado el caso singular, con todos sus accidentes y a encontrar, en este sacrificio de lo que importa poco para conservar lo que importa mucho, una de las excelencias peculiares del método de las matemáticas (Thompson;1992).

La biología, es la ciencia que estudia la vida; la vida se estructura gracias a fuerzas diferentes que podemos estudiar y comprender incorporando planteamientos matemáticos. Debemos aprender del pensamiento complejo a descartar lo que es menos importante y rescatar lo que durante años hemos olvidado, debemos desentrañar la dinámica de la vida porque la vida es dinámica.

El mundo orgánico es tan matemático como el mundo inorgánico, sin embargo las bases matemáticas de los seres vivos son, a diferencia de las otras manifestaciones matemáticas en la naturaleza, más flexibles y de alguna manera ocultas. Thompson no pretendía encontrar la ecuación que describiera la complejidad matemática inherente a los seres vivos (ello lo haría caer en el reduccionismo) sino mostrar que dentro de los secretos de la vida existen patrones matemáticos, que generan la diversidad de formas presentes. Por medio del reconocimiento de la existencia de dichos patrones podemos acceder a un mejor entendimiento de la dinámica de los seres vivos, complementar las concepciones clásicas de la biología y generar una idea más completa de la relación de la vida y el mundo que la rodea y la conforma.

A pesar de que la idea propuesta por Thompson –de la estrecha relación entre las matemáticas y la biología– se consideró poco ortodoxa y asociada con los científicos disidentes que fueron excluidos por no concordar con las teorías predominantes, ésta vinculación permaneció como parte de las teorías dominantes, “conforme las corrientes principales se movieron la idea se movió con ellas” (Stewart; 1998). Thompson empezó sus observaciones con base en fotografías tomadas del microscopio durante el siglo XIX, donde se mostraban células en proceso de división celular; en ellas nota la existencia de patrones claros y de regularidades en diferentes tipos de células. A partir de este descubrimiento prosigue su investigación con el fin de buscar dichos patrones en otras formas vivas. De esta manera descubre la existencia de patrones aritméticos en el arreglo de los cromosomas y hace analogías entre la división celular y las teorías de la electricidad y gravitación, comparando el aspecto del arreglo cromosómico y el campo de fuerza generado al poner dos polos eléctricos iguales. También relacionó este fenómeno con la difusión química desarrollada en experimentos caseros de tinta y agua con sal.

La diversidad de fenómenos que exploró a lo largo de toda su vida muestran la necesidad que Thompson tenía de comprobar sus planteamientos y relacionar a los fenómenos vivos con los que solamente son de tipo físico o químico. Por ejemplo al analizar la división celular observó que ésta se comporta de la misma manera que las burbujas de jabón y a partir de ello argumenta que la materia inorgánica al igual que los sistemas vivos utilizan para conformarse los estados de menor energía y menor área. Este es el punto de partida para que su curiosidad le hiciera descubrir que en todos lados dentro de la complejidad de la vida existían patrones de comportamiento que generaban toda la diversidad de formas existentes en nuestro planeta. Es decir proponía la presencia de una fuerza, de un patrón básico observable en cada ser vivo. En realidad no existe, en términos reales, esa gran diversidad aparente de formas; para Thompson somos en sí transformaciones de

un mismo plan estructural básico.

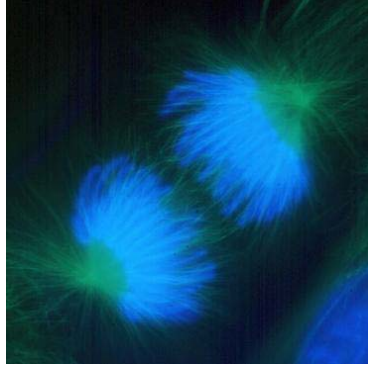


Figura 10. Imagen de de células de pulmon de salamandra con tinción de fluorescencia, en la que se muestra una célula en anafase durante la mitosis.(en www.wikipedia.org).

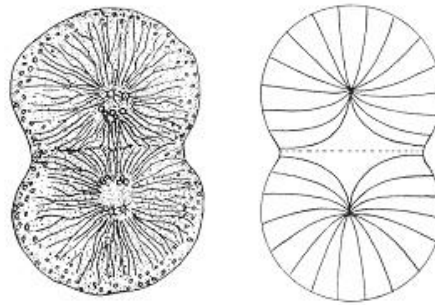


Figura 11. Imagen que muestra la comparación hecha por D'Arcy Thompson en su libro *On Growth and form*, entre un campo magnético y la primera segmentación de huevo de *Cerebratulus* (en Thompson, 1992).

3.3. La teoría de las transformaciones: las leyes matemáticas de la vida o una simple fantasía

Thompson en su gran interés por comprobar sus teorías elaboró en su libro *On Growth and Form*, un capítulo acerca de la teoría de las transformaciones (On the theory of transformations, or the comparison of related forms). En él nos muestra su visión acerca de la morfología y la importancia de la geometría en el desarrollo de las formas en el mundo vivo. Desarrolla un plan en el que trata de mostrar la importancia de las fuerzas que actúan sobre una forma dada y afirma que gracias a la combinación de formas

apropiadas, cualquier forma de materia puede ser transformada en cualquier otra. En función de ello dos formas vivas están completamente relacionadas mediante transformaciones continuas en un plano. Esto lo explica mediante un proceso matemático que representa en una ecuación en la que supone que la forma A , representada en un plano cartesiano en coordenadas rectangulares XY , está relacionada con la forma B si existe una transformación T que cambie las coordenadas al nuevo sistema UV , donde

$$T(X, Y) = (U(X, Y), V(X, Y))$$

es tal que cada punto de A se convierte, bajo T , en un punto homólogo de la forma B en el plano UV . Es decir, que

$$T(A) = B$$

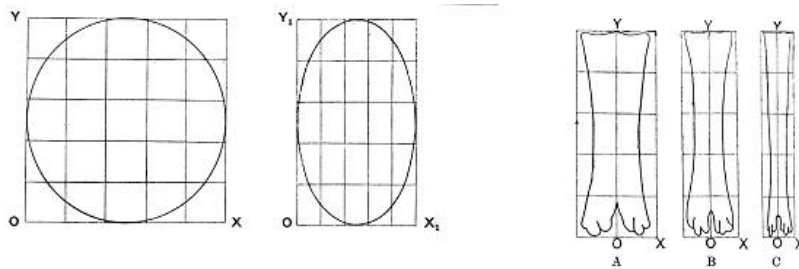


Figura 12. Rejilla en la que se muestra la transformación proporcional de la configuración inicial de un hueso de buey, en el de un borrego y una jirafa respectivamente (en Thompson, 1992).

El objetivo de este planteamiento es deformar continuamente el plano como si fuera una liga en la que dependiendo de las fuerzas de tracción aplicadas se generan las transformaciones hasta hacer coincidir las líneas originales de A en las de B . (véase Miramontes y Gutiérrez; 1996).

En el libro de Thompson se incluyen diferentes ejemplos en los que se aplica esta teoría y es realmente sorprendente cómo utilizando este método vemos la transformación de un pez de una determinada especie en otro de una especie diferente, con sólo utilizar una rejilla cartesiana rectangular y utilizando una transformación lineal. De igual modo podemos ver transformaciones de cráneos que van desde el de un humano hasta el de un perro pasando por el chimpancé y el mandril. Estas transformaciones se pueden realizar mediante un mapeo cuadrático y podemos observar que especies muy lejanas en cuanto a su morfología pueden ser vistas mediante estas transformaciones con una relación clara entre ellas. Este mismo principio lo

utiliza para comparar no solo la morfología externa sino también la organización interna de los seres vivos, concebida como unidad estructural. En este aspecto compara el orden de los órganos entre diferentes especies.

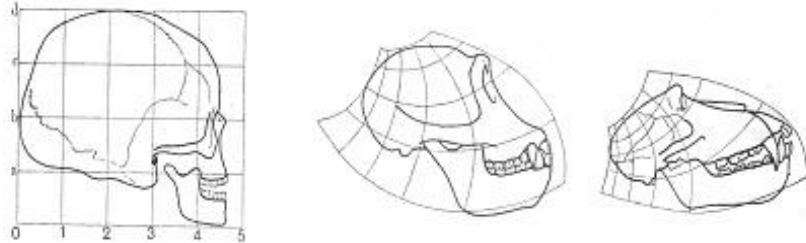


Figura 13. Transformación del cráneo humano en el de chimpancé y babuino (en Thompson, 1992).

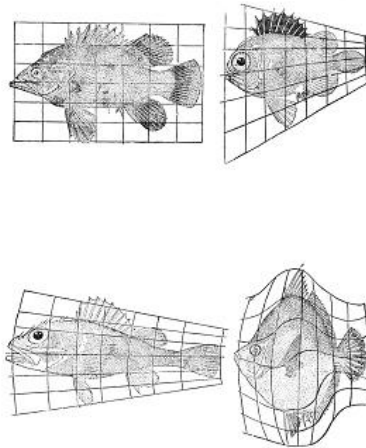


Figura 14. Transformación de los peces *Poliprion*, *Pseudocanthus altus* y *Scorpaena sp.*, *Antigonina carpos* (en Thompson 1992).

Es probable que se piense que esta teoría puede ser el resultado de la mente de un hombre convencido de sus planteamientos y que el amor ciego hacia este procedimiento lo llevó a ajustar los datos para comprobar las transformaciones. En realidad Thompson fue una mente que se adelantó a su tiempo y sus limitaciones se debieron a la carencia de una teoría acerca de los sistemas dinámicos, tal como han sido desarrollados actualmente. Aun así es posible vislumbrar en sus propuestas el manejo de modelos matemáticos que actualmente son desarrollados gracias al recurso de las computadoras.

Mi interés aquí es mostrar la validez de las propuestas de Thompson. Las transformaciones dentro de un mismo linaje son posibles hasta cierto punto,

no podemos transformar a un camarón en un ser humano con este método, pero podemos concluir que dentro de los seres vivos existen unidades morfológicas que se han ido diversificando gracias a dichas transformaciones. En realidad somos el resultado de unidades estructurales arquetípicas y no una infinidad de posibilidades: “Se puede, entonces, conjeturar que la escasez de formas vivas se refleja en que si bien las especies de cada phylum son muchas – centenas de miles, quizá millones – los phyla son menos de cuarenta” (Miramontes y Gutiérrez; 1996).

Podemos agregar que los planteamientos antes propuestos nos ayudan a comprender uno de los puntos faltantes en la explicación del surgimiento de las formas en los seres vivos. Según la historia darwiniana de la vida no somos capaces de explicar la ausencia de numerosas formas en el conjunto de los seres vivos existentes. Si pensamos en la selección natural y en la concepción neodarwiniana de la variabilidad genética, podríamos plantearnos la hiperadaptabilidad como motor de la evolución y el dicho “si dios le hubiera dado alas a los alacranes” no sería sólo una metáfora. Sin embargo la cantidad de formas vivas es mínima con relación a las posibilidades infinitas que podría haber según la historia planteada por Darwin, quien no explica el porque de las formas faltantes. Al concebir que se han desarrollado a lo largo de la vida planes estructurales básicos o arquetipos, es más factible comprender la diversidad de formas sobre la tierra que son resultado de los procesos de transformación planteados en el trabajo de D’Arcy Thompson.

La necesidad de descubrir las claves morfológicas en la dinámica de los seres vivos comenzó antes de que Thompson elaborara sus grandiosos planteamientos. Un ejemplo de esto es, Étienne Geoffroy Saint-Hilaire quien peleó hasta su muerte por desarrollar una teoría que comprendiera las relaciones que existen entre los grupos animales buscando planes estructurales comunes. Ha pasado mucho tiempo de esto y su lucha empieza a tener un eco dentro de las teorías biológicas que recurren a los enfoques de los sistemas complejos, por lo que es muy importante conocer los primordios que dieron origen a nuestros planteamientos.

En el siguiente capítulo plantearé los mecanismos que se han relacionado con la generación de formas en la materia y su participación en la dinámica morfológica. Al adentrarnos en los mecanismos que son utilizados para generar sistemas complejos y en este caso en particular, formas, podemos comenzar a entender realmente cuales son los secretos que encierra el estar, en el borde del caos.

Un punto muy importante en el desarrollo de los sistemas complejos en la naturaleza es el fenómeno de rompimiento de simetría, con el cual se generan cambios drásticos en la evolución de los sistemas como resultado

de desequilibrios termodinámicos. De esta manera dichos sistemas sufren transformaciones impredecibles y sorprendidas creando la diversidad de formas que podemos observar. De aquí la importancia de tratar a los predecesores del pensamiento complejo y la relevancia del estudio morfológico y de sus transformaciones.

Capítulo 4

Complejidad y biología moderna. Del Big Bang al Proyecto Genoma humano

4.1. La simetría, una ley que debe romperse

El mundo que nos rodea está formado por muchos patrones que surgen de manera periódica y sorprendente, estructurando volúmenes y formas diversas en las que el mundo inorgánico se expresa con gran habilidad. ¿De donde surge esta capacidad? En gran parte proviene de un principio simple pero fundamental: la simetría.

La importancia de la simetría en el universo es enorme, de hecho éste ha evolucionado en gran medida al establecimiento de la simetría y como veremos más adelante al rompimiento de la misma como consecuencia del desequilibrio termodinámico.

En los inicios de nuestro universo la presión y la temperatura impedían el establecimiento de las partículas elementales. Quarks y leptones eran incapaces de formar objetos estables hasta que el universo se enfrió después de una fase de supergravedad. La pregunta que surge es ¿si las partículas elementales en el universo no se podían establecer permanentemente, y el espacio no era siempre el mismo, entonces qué permaneció siendo lo mismo, la respuesta es la simetría. La simetría fue y es nuestra propia identidad, además de ser lo único que pudo conservarse durante el flujo y cambio del universo en formación.

A pesar de la idea de que las partículas son creadas y destruidas constantemente, siempre existe en el proceso la generación de simetría. Por ejemplo,

por cada electrón virtual se genera un positrón virtual o anti-electrón, formando así a nuestro mundo simétrico. Esta característica principal se dió en cada interacción en el universo temprano. La simetría funcionó como una ley de conservación, limitando las posibles interacciones entre partículas y por lo tanto la existencia de simetría proveyó un cierto orden en el universo.

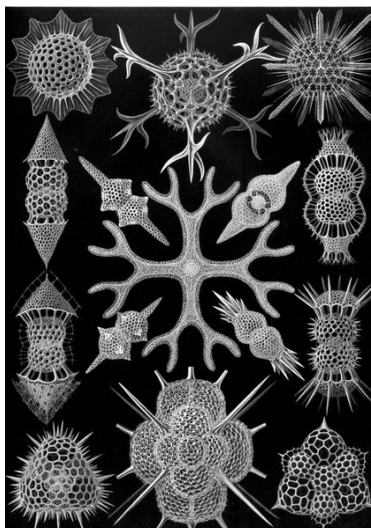


Figura 15. Ilustración que muestra la variedad estructural de Spumellaria elaborada por Ernst Haeckel en “*Kunstformen der Natur*” (1904) (en www.wikipedia.org)

La simetría pura se puede explicar como una moneda girando, la moneda tiene dos estados pero el hecho de que esté rotando la mantiene con sus dos estados al mismo tiempo, cuando la moneda toca el piso dicha simetría se rompe. Para que este proceso suceda es necesario el uso de energía. El efecto del rompimiento de simetría en el universo temprano produjo una serie de cambios de fase como cuando el agua pasa de un estado a otro; de esta manera se estructuró un universo distinto y los cambios fueron radicales. El universo evolucionó, surgió el espacio tiempo. Junto con la etapa de rompimientos de simetría, la masa y el espacio tiempo se separaron y las partículas elementales comenzaron su existencia, haciendo que surgiera el proceso de complejización.

El tiempo de la simetría era caracterizado por la presencia de fuerzas en equilibrio, toda la masa se resumía en un valor cero. En el momento en el que apareció el rompimiento de la simetría como fenómeno inherente a la evolución del universo, se generó por consiguiente menos orden y más caos.

Ello nos permite afirmar que “las simetrías son importantes porque restringen el comportamiento del universo físico. Los rompimientos de la simetría son importantes porque explican inesperados cambios en la forma” (Stewart; 1998). Entonces la existencia de un continuo proceso de generación de simetría y rompimiento de ella cambió drásticamente la historia y ahora podemos contarla gracias a que por ello fue posible nuestra propia emergencia.

Es muy importante para mí el descubrimiento de que el caos en el universo produjo la diversidad de formas que ahora podemos admirar cada vez que despertamos. El caos en el “principio” no fue más que una gran solución para un universo que “decidió” tomar un camino que ahora intentamos comprender.

El rompimiento de la simetría es un principio universal aplicable a todos los sistemas simétricos. Los sistemas pueden ser completamente distintos pero su comportamiento es similar debido a la presencia de la misma simetría y en consecuencia “el rompimiento de simetría se extiende muy profundamente en la naturaleza. Explica no solamente patrones sino también las analogías entre los patrones. . . explica y unifica una sorprendente variedad de patrones en las criaturas vivientes” (Stewart; 1998).

La importancia de los rompimientos de simetría en este trabajo es enorme ya que al plantear a la complejidad como parte fundamental de los sistemas vivos, retomamos la pregunta del origen de los sistemas complejos. Los rompimientos de la simetría existentes en el comienzo del universo dieron lugar, conforme se dio su evolución, al aumento de la complejidad debido a la emergencia de variedades estructurales, desde las estrellas hasta los seres vivos, a partir de partículas elementales en estado de equilibrio que sufrieron una fase de transición o rompimiento de la simetría: la emergencia del orden a partir del caos.

Los rompimientos de simetría son parte fundamental en el surgimiento de las formas y cumplen un papel muy importante en el desarrollo embrionario, en el comportamiento molecular, e inclusive, el mismo DNA con todo su poder obedece a los fenómenos de desimetrización.

Por lo anterior podemos darnos cuenta de que el establecimiento de la simetría y el paso en el que se generó el rompimiento de la misma son muy importantes en el análisis de la materia y sus componentes, pero es importante ver que ésta no es la respuesta a las pregunta acerca de la emergencia de la vida. “la materia por sí sola no produce nada, no cambia nada, no hace nada” (D’arcy Thompson; 1992). Es necesario considerar además los procesos dinámicos que se generan en la interacción de sus componentes. El rompimiento de la simetría permite la transformación de los sistemas

y genera formas más complejas; un ejemplo importante de este hecho es el desarrollo embrionario, todo comienza con una simple esfera y a través de múltiples transformaciones se genera una simetría bilateral que además no es completamente simétrica, algunos somos diestros, otros zurdos y sólo tenemos un corazón.

4.2. Las propiedades protegidas de la materia

En qué momento la materia dio lugar a la emergencia de la vida, La respuesta es difícil sobre todo partiendo de que mucha de la información acerca de la evolución de nuestro universo se basa en planteamientos de la ciencia lineal. Para rebasar esta carencia es importante introducir otras propuestas que son fundamentales en la comprensión de los componentes que dieron lugar a la emergencia de la vida, como la autorganización.

En este enfoque el estudio de la materia debe partir de la certeza de que el conocimiento en sí mismo de los componentes más pequeños de un sistema no nos va a llevar a entender las propiedades y el comportamiento que surge de la interacción de las partes. Podemos hablar de muchos ejemplos en los que los componentes materiales no determinan el desarrollo del sistema. Un ejemplo es el surgimiento de los elementos químicos, los cuales a partir de los mismos átomos y partículas elementales dieron lugar a los ya conocidos elementos de la tabla periódica. Este conjunto de componentes además no generaron un número infinito de elementos; los elementos químicos caven en una simple hoja de papel.

Otro ejemplo muy interesante que nos muestra que las soluciones de algunos procesos o mecanismos siguen los mismos patrones pero parten de diferentes sistemas, como puede serlo un fenómeno físico o una reacción química o un proceso biológico, es el de la reacción de Belussov-Zhabotinsky en nombre de los investigadores rusos que la descubrieron. Ésta reacción consta de la mezcla entre sustancias químicas orgánicas e inorgánicas que al reaccionar generan anillos concéntricos con intervalos regulares, los cuales al encontrarse con otros no forman interferencia. Cada patrón conserva su forma individual y simplemente desaparecen al encimarse unos con otros. Estos patrones nos recuerdan a los que observamos en un tiro al blanco, pero en vez de ser uno solo van invadiendo progresivamente la caja de vidrio donde fueron puestos a reaccionar.

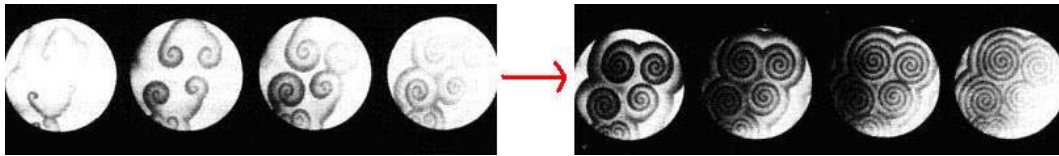


Figura 16. Patrones espirales en la reacción BZ en función del tiempo (en Stewart,1998).

Este descubrimiento generó gran expectación en el mundo científico y sobre todo por el hecho de que existen patrones idénticos observables en crecimientos celulares de amebas en cultivo o de bacterias con una alta concentración de glucosa en el medio. El descubrimiento es asombroso; en el universo se producen patrones idénticos a partir de una simple reacción química o de un proceso en el que interviene el desarrollo de un grupo de células.

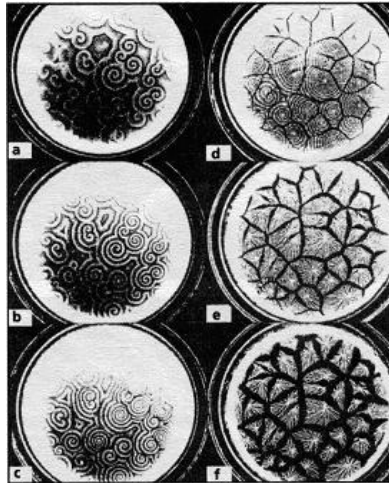


Figura 17. Foto de los patrones de agregación química en la reacción BZ (a,b,c) y de amebas en cultivo (d,e,f) (Stewart,1998).

Se trata de un proceso bastante más complejo que el de la interacción química. La pregunta que surge es, será una simple coincidencia. La respuesta puede explicarse sólo con el hecho de que en la naturaleza los componentes de un sistema no intervienen por sí solos en la emergencia de patrones espaciales; el medio donde se desarrolla cumple una función muy importante y es la manera en la que interactúan los componentes en el tiempo y el espacio la que desarrolla la formación de patrones estructurales. Estos fenómenos se dan gracias a la autoorganización, y en este caso se expresa como la capacidad que tiene un campo de generar patrones que surgen espontáneamente de

manera emergente y sin la instrucción predeterminada de que hacer, como lo haría la información genética.

A partir de estos ejemplos podemos introducir un hecho muy importante en los sistemas complejos y es la existencia de los protectorados o propiedades protegidas de la materia términos que nos permiten explicar la manera en la que se organiza la materia. Un protectorado puede ser definido como: un sistema que es insensible a las propiedades microscópicas y por lo tanto tiene la característica de no estar codificado en los componentes materiales, “el alcohol no tiene un código que le preestablezca que va a terminar como daiquirí en una fiesta o en la herida de un paciente” (Cocho y Miramontes; 2000), o un organismo no sólo depende de la existencia de sus genes.

Las propiedades emergentes que producen patrones macroscópicos no tienen una relación causa-efecto directa con las características microscópicas del sistema, por lo que podemos estar felices ya que de otra manera estaríamos en aprietos pues para tratar de entender cualquier fenómeno tendríamos que comprender las estructuras atómicas de las moléculas, de las células, de los tejidos de los seres vivos, y caeríamos en el conocimiento exhaustivo de la nada, o en el peor de los casos podríamos incluir a la biología dentro de un área de la física.

Un ejemplo de la presencia de los protectorados en los sistemas vivos es la existencia de fractales. Un fractal es un objeto que presenta la misma estructura independientemente de la escala en la que se observe. En la naturaleza podemos encontrar una gran cantidad de ejemplos en los que la forma toma una configuración fractal, como por ejemplo el cerebro de los mamíferos, en donde encontramos que las estructuras más pequeñas se parecen a las más grandes al igual que en las redes vasculares, las arterias, los bronquios, la placenta, los ductos pancreáticos, el ducto biliar, el sistema urinario, el arreglo foliar en diferentes grupos de plantas, la manera en la que se forman colonias de microorganismos, por nombrar algunos. Pero lo más interesante es que dichas estructuras con características fractales también se pueden encontrar con una gran similitud en fenómenos de naturaleza únicamente física o química. Es decir, las formas fractales son insensibles a los componentes microscópicos y a simple vista aparecen como estructuras de la misma naturaleza. Por lo tanto la materia (que es la misma para lo vivo y lo no vivo) no determina la emergencia de un órgano ni la acumulación fractal de partículas de polvo en el aire, es el sistema el que se autoorganiza gracias a la interacción de las partes. La materia se autoconstruye generando niveles de organización o jerarquías cada vez más diferentes unas de otras, desde las partículas elementales- átomos- elementos- hasta lograr una diversificación

tal que podemos observar individuos cada vez más complejos.

Somos el colectivo de una gran variedad de estados jerárquicos, colectividad existente gracias a que la materia se protege y permite que emerjan dichas jerarquías, propiedades en las que si no existiera el individuo nada tendrían sentido. La individualidad es la base de una buena colectividad.

No existe una orden que determine la variedad estructural en nuestro universo, es sólo el resultado del proceso colectivo de autoorganización. De esta manera podemos concluir que los materiales son importantes pero son sólo el sustrato, sin los protectorados, la autoorganización y las propiedades emergentes no podrían estructurar absolutamente nada que pueda definirse como vivo. La vida necesita algo más que un montón de ingredientes y de esto se encargan la autoorganización y los protectorados.

El siguiente paso es comprender cómo estos fenómenos inherentes a los sistemas complejos intervienen en la formación y transformación de los sistemas vivos y de que manera influyen en la emergencia de patrones que de modo sorprendente han surgido en la evolución de la vida.

4.3. La generación de formas, una respuesta emergente

Uno de los problemas más importantes en la ciencia moderna es el entendimiento del surgimiento de las formas orgánicas; cómo a partir de los mismos principios celulares emergen muy diferentes soluciones y de diferentes formas surgen estructuras similares- como por ejemplo el caso del ojo, el cual evolucionó de la misma forma en muy diversos grupos animales y no, de la forma que lo plantea la teoría de la selección natural como un caso azaroso individual que prevaleció gracias a la gran ventaja que generó en los organismos que lo presentaron.

La emergencia de formas en los seres vivos es un proceso dinámico en el que el desarrollo embrionario tiene una fuerte importancia. Esto es debido a la existencia de patrones de desarrollo dentro de las diferentes grupos de seres vivos que permiten y facilitan la aparición de formas, como es el caso del ya mencionado ojo como estructura visual. De esta manera las estructuras no aparecen como fenómenos aislados; son el resultado de la autoorganización del proceso de desarrollo que se da de manera similar en diferentes partes dentro de la historia de la vida.

Un ejemplo muy citado en este punto es el sorprendente desarrollo morfológico de *Acetabularia acetabulum*. Esta alga vive en las costas mediterráneas en aguas poco profundas y su desarrollo embrionario comienza con

la fusión de dos células sexuales de las cuales surge un cigoto. A partir de esta única célula se desarrollan rizoides y un tallo que alcanza hasta cinco centímetros de longitud, posteriormente surgen anillos de “pelos” cerca del extremo del tallo formando una estructura llamada verticilo. El verticilo al alcanzar la madurez se abre en forma de disco, de manera similar al cuerpo de un hongo. Lo misterioso de la forma que desarrolla esta alga, es que aparentemente no existe una función biológica que explique la presencia de dicha estructura, además de que morfológicamente es bastante compleja para que la desarrolle una célula sin ninguna causa de peso.

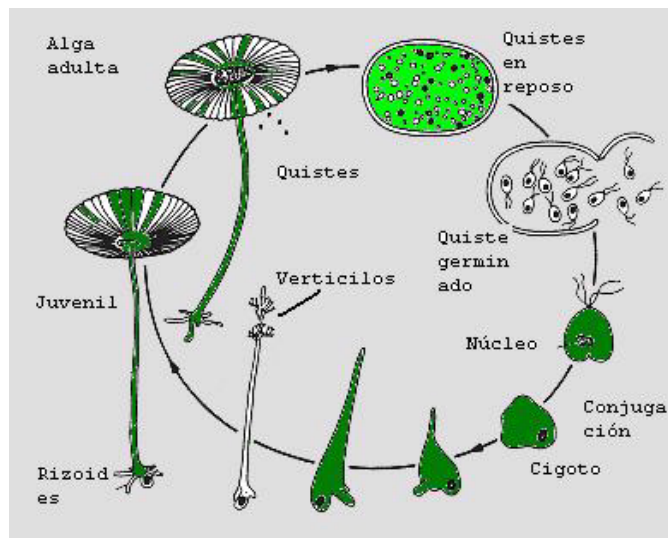


Figura 18. Ciclo de vida de *Acetabularia acetabulum*,. En este esquema podemos ver el desarrollo de dicha alga desde la germinación hasta la emergencia del verticilo en la célula adulta.

Al no encontrar la función de esta estructura nos preguntamos ¿cuál es la razón de su existencia?, según la postura Darwinista, *Acetabularia* fracasó en la búsqueda de su función o en el mejor de los casos ya no existe función alguna pero algún día la tuvo y ahora no es más que un simple vestigio. Desde luego que para este trabajo dichas soluciones son la muestra de que el camino fácil no siempre es el que la vida sigue.

En este sentido se han realizado modelos matemáticos en los cuales se intenta comprender las transiciones morfogénicas y de esta manera esquematizar los pasos que sigue un organismo al llevar a cabo el proceso de desarrollo del embrión. Dentro de dichos modelos se incluyen aspectos importantes sobre la regulación celular del calcio, cambios mecánicos en el citoplasma, las reacciones que se dan en la pared celular y muchos

otros factores involucrados en el proceso, creando así un sistema complejo matemáticamente hablando y relativamente sencillo en términos biológicos. La sorpresa surgió cuando al modelar el proceso morfogénético de *Acetabularia*, se encontró con que no existía una enorme cantidad de pautas de desarrollo, como se esperaba, sino que la forma que *Acetabularia* genera es una propiedad profunda que surge de la dinámica del sistema. Al analizar el porqué molecular de la formación del verticilo se descubrieron fluctuaciones en los niveles de calcio en ciertas zonas del tallo a medida que se daba el crecimiento, dichos cambios formaban un anillo con un alto nivel de calcio y una mayor tensión, provocando que la pared se ablandara y aplanara en la punta, formándose la misteriosa estructura.

Lo más interesante de esto es que la generación de la forma de estas algas está determinada mucho más allá de la función que tenga o el beneficio que le traiga al organismo poseerla. Todas las especies pertenecientes a este grupo de algas generan el verticilo espontáneamente, de manera que se piensa que dicha estructura es una propiedad que emerge de la dinámica del sistema, “la razón por la cual todos los miembros de las dasicladáceas producen verticilos puede ser que sea una forma natural que surge de los principios dinámicos contenidos en la organización de la célula. Algunas especies los utilizan, otras no, pero todas las generan” (Goodwin en Lewin; 1995).

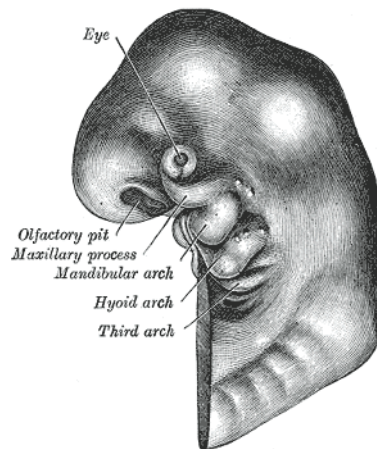


Figura 19. Ilustración de un embrión humano a la cuarta semana de gestación tomada del libro *Henry Gray's Anatomy of the human body*, 1858.

El crecimiento de *Acetabularia* y el de las plantas en general se da de manera continua ya que tienen ciertas restricciones mecánicas. En el caso de

los embriones animales existe una mayor plasticidad y por lo tanto desarrollan una mayor cantidad de soluciones complejas, como por ejemplo, las deformaciones de las capas celulares, la migración y diferenciación celular, que junto con otros procesos permiten que los animales posean una compleja estructura interna y desarrollen soluciones morfológicas increíbles.

Los animales al igual que las plantas, algas y demás seres vivos, poseen patrones fundamentales que actúan en el desarrollo y establecimiento de las formas que ahora conocemos. De esta manera se descubren regularidades que nos ayudan a comprender el proceso dinámico que se requiere para la elaboración de las formas biológicas. Pero ¿de qué manera se llega a la elaboración de soluciones morfológicas intrínsecas a los sistemas y cómo se dan las regularidades de dichas soluciones?. Esta es una pregunta muy importante para los buscadores de respuestas dentro de los sistemas complejos y en este punto voy a introducir un nuevo planteamiento: la existencia de grandes atractores morfogenéticos.

El surgimiento de una estructura específica en distintos organismos o formas vivas esta dado, según la línea de pensamiento que he propuesto, por atractores morfogenéticos que forman parte de un grupo de “atractores” llamados extraños que dirigen dinámicas dentro de los sistemas complejos, y que podrían definirse como “Un conjunto de puntos o estados en el espacio hacia los cuales convergen asintóticamente durante un tiempo largo las trayectorias dentro de cierto volumen del estado espacio . . . Después de un tiempo, las variables muestran una oscilación repetitiva.”¹(Kauffman, 1993).

Los atractores morfogenéticos tienen la capacidad de limitar los estados posibles de la forma, por esta razón pueden aparecer morfologías similares en especies distantes, además de generar un número limitado de figuras distintas apareciendo los ya nombrados patrones estructurales. El espacio en donde se desarrolla una determinada forma, controla la evolución del sistema en desarrollo, he aquí la respuesta al surgimiento repetitivo del globo ocular o de las alas como estructura para volar.

El sistema se organiza en función y dirección de los atractores extraños. Cada sistema posee diversos atractores que de alguna manera limitan las posibilidades de desarrollo dentro del sistema, esto se contrapone con la idea de que cualquier forma viva es posible siempre y cuando pueda adaptarse al medio al que pertenezca, todo puede surgir de manera azarosa casi mágica, pero no todos pueden lograr ser aptos.

¹ “Is a set of points or states in state space to which trajectories within some volume of state space converge asymptotically over time... Over time, the variables exhibit a repetitive oscillation.”

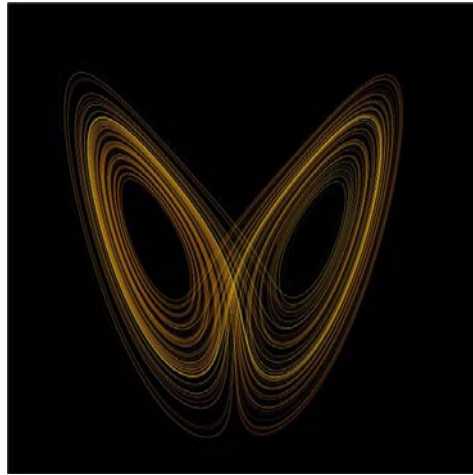


Figura 20. Atractor de Lorenz (en www.wikipedia.org)

La realidad dentro de esta perspectiva es otra, las formas que conocemos, son el resultado de dinámicas limitadas por atractores extraños; dichos atractores son claramente observables desde la mecánica morfogénica en el desarrollo embrionario, en el cual se observan claras pautas de orden que desde los morfólogos racionalistas como Sain-Hilaire, Thompson, Kant, Goethe, entre otros, tomaron un lugar muy importante en la investigación biológica por el gran interés en descubrir las leyes que rigen el surgimiento y desarrollo de las formas vivas.

Como ya vimos el problema de las formas biológicas es un área de investigación muy amplia en la que todavía quedan muchas cosas por saber. Todo en el universo posee una forma, algunas son similares y otras muy distintas, en diferentes tiempos y espacios, pero todas siguiendo patrones estructurales que han tratado de ser descritos y comprendidos bajo la lógica de una dinámica en la que participan el caos, el orden y la emergencia de patrones intrínsecos, límites espaciales y materiales, transformaciones, interacciones y múltiples fenómenos que describen a los sistemas complejos. En este trabajo he tratado de armar el rompecabezas del surgimiento de la forma aunque quedan muchas cosas sin resolver.

Desde este mundo complejo la historia es otra, para comprenderla y contarla hay que por algunos instantes tratar de salirse y desde otro espacio observar la vida como algo más que el resultado de sus genes. En la siguiente sección presentaré algunos problemas que surgen al considerar a los ácidos nucleicos los amos y dueños de la vida, y al proyecto Genoma Humano como un síntoma de la ambición del reduccionismo en la biología contemporánea.

4.4. El proyecto Genoma Humano y el todos somos genes

El interés por incluir este apartado en mi trabajo se debe a la gran expectativa que surge a raíz de que se da fin a la secuenciación del código genético humano dentro del proyecto Genoma Humano; quizás el más ambicioso ejemplo de reduccionismo en la historia a nivel mundial, ya que para llevarlo a cabo se requirió de una gran cantidad de investigadores que representaron a las grandes potencias o punteros en la investigación genética en el mundo, y desde luego una enorme cantidad de dinero invertido.

inumerables veces me he topado con comentarios acerca de la importancia que tiene este proyecto, aunque muchas veces no tengan ni idea de que es el DNA, pero eso sí, la esperanza o fe ciega acerca de los “avances” de la ciencia y de hasta donde hemos llegado. Este libro es el espacio que he encontrado para hablar de los problemas del reduccionismo en la investigación genética, que creo han llegado a su cumbre con el proyecto Genoma Humano.

El objetivo del proyecto Genoma Humano fué: determinar la ubicación exacta y la lógica molecular que siguen cada uno de los genes y los segmentos de interconexión incluidos en los cromosomas humanos, para de esta manera, descubrir todo acerca del funcionamiento del organismo y del desarrollo de las enfermedades, ya que se considera que “dentro de estas cadenas retorcidas está la llave de todo lo que un organismo es y hace” (Lee; 1994).

El proyecto plantea que los genes son la base de todos los fenómenos relacionados con la vida y se afirma que su logro “podría conducir al control definitivo de las enfermedades humanas, al envejecimiento y la muerte” (Lee; 1994). En resumen, afirma que sólo somos el resultado de la composición de nuestros genes.

La historia comienza cuando las ciencias biológicas cambian el rumbo de la investigación y transforman la visión naturalista y la explicación descriptiva de los fenómenos vivos, adentrándose al mundo microscópico de las células; a partir de 1953 cuando James Watson y Francis Crick descubrieron la estructura del Ácido Desoxirribonucleico (DNA) que les dio el premio Nóbel en 1962 junto con Maurice Wilkins. Históricamente el logro de esta investigación fue muy importante en el marco de la ciencia lineal ya que los sistemas biológicos revelan la clave de su función directamente a través de su estructura. Al descubrir la estructura del DNA se sabría con el tiempo su función y por consiguiente la de todo ser vivo que la posea.

Desde este momento la investigación dio un giro sorprendente y muy

importante pero como ya lo he planteado a lo largo de este trabajo, no podemos reducir a los seres vivos y a las complejas relaciones que generan, a una sola explicación... cualquiera que esta sea.

El proyecto Genoma Humano ha logrado la secuenciación de todos nuestros genes; el paso siguiente es encontrar sus limitaciones.

En esta sección plantearé algunos de los problemas que surgen al considerar la información dentro de nuestros cromosomas, como la única encargada de llevar todas las funciones del organismo. Lo haré siguiendo la línea de pensamiento que a lo largo de este trabajo he propuesto.

Alrededor de este tema surgen miles de preguntas acerca del alcance que puede tener el conocimiento total de las secuencias del genoma humano, de hecho se plantean serias cuestiones éticas y morales alrededor de los alcances que este conocimiento puede tener en manos equívocas o ingenuas, pero a menudo no se analizan las restricciones que presenta. Todo parece indicar, o así se proclama, que desde este momento no existen límites en la utilización de nuestros genes y el futuro de la biología es la biología molecular y la genética.

¿Será posible manipular la complejidad de la vida desde un laboratorio y generar todas las relaciones que existen en cada ser vivo sólo con el conocimiento de su material genético? ¿será posible combatir todas las enfermedades? ¿evitar la muerte?...

En este trabajo he propuesto una línea de pensamiento que difiere mucho del reduccionismo como base fundamental en el proceso de adquisición del conocimiento, sin hacer a un lado lo que nos ha proporcionado y seguirá generando. Como plantea Goodwin “El reduccionismo de la biología molecular ha sido importante y no cabe duda de que aprenderemos mucho más de él. Pero, en el entusiasmo por acumular más y más datos sobre lo que la gente considera como el nivel fundamental de los sistemas biológicos, se ha hecho caso omiso del organismo. Es el momento de cambiar.” (Goodwin en Lewin; 1995).

En los capítulos anteriores he presentado distintas cuestiones acerca del problema del surgimiento de las formas vivas, en este sentido el conocimiento de nuestros genes no ha podido explicar en su totalidad el desarrollo del embrión ni el proceso evolutivo ya que forman parte de complejas redes dinámicas. Los sistemas con dinámicas complejas son generalizables y por lo tanto existen miles de cosas que no pueden explicarse dentro de esta línea. Como comenta el matemático Stanislaw Ulam, “decir que la ciencia del caos es el estudio de los sistemas no lineales es como afirmar que la zoología es el estudio de los animales que no son elefantes” (Ulam en Hayles; 1998).

Los biólogos moleculares se olvidan de que existen dinámicas en las que

interfieren muchas otras cosas como lo son las interacciones ecosistemáticas y la dinámica de poblaciones, por mencionar sólo un ejemplo; y desde luego no consideran un punto muy importante que poseen todos los seres vivos, la emergencia de pautas en el comportamiento del sistema.

La historia planteada por Darwin fue de gran importancia para el desarrollo de la investigación alrededor del material heredable. En el Origen de las Especies, Darwin afirma que los seres vivientes cambiaron de forma gradual a lo largo del tiempo, desde los más simples a los más complejos que conocemos y algunos que se extinguieron en la lucha por la supervivencia. A partir de sus teorías en las que hablaba de la existencia de algo encargado de transmitir la herencia, se desarrolla de manera incansable la búsqueda de la lógica molecular de los seres vivos y de centralizar de manera absoluta las funciones del organismo a la información genética, siendo ésta uno de los principales motores de la evolución.

El proceso evolutivo debía seguir ciertos principios y planteó lo siguiente: los organismos varían y dichas variaciones son en alguna medida heredables. Debido al hecho de que todos los organismos generan más descendientes que los que sobreviven para ser adultos, los que logren sobrevivir, serán los que heredaron ventajas para su adaptación local. Esta selección de los hijos más aptos produce una población con variaciones que puede dar lugar eventualmente a una nueva especie, la cual deberá presentar características diferentes a sus parientes cercanos, de manera que no tengan capacidad reproductiva entre ellas. El aislamiento reproductivo que se da en este proceso genera diferentes poblaciones que pueden dar lugar a la aparición de otra especie gracias a una nueva selección.

Junto con estas teorías Darwin planteó una hipótesis provisional acerca de la herencia, en la que habla de que existen partículas invisibles llamadas “gémulas” existentes en todas las células del organismo. Estas gémulas sufrían alteraciones por la influencia ambiental. Las modificaciones a dichas partículas eran transferidas de alguna manera a las células reproductoras, quienes presentaban las nuevas partículas modificadas. Cuando se llevaba a cabo la reproducción sexual, el nuevo organismo era el resultado de características distintas y nuevamente sujeto a la selección natural.

Para Darwin la solución a este problema fue sólo un sueño, porque aunque ya en su tiempo existían investigaciones y descubrimientos que hablaban más certeramente de la herencia, él nunca tuvo acceso a ellas. Se dice que Mendel conocía, como todo el mundo, los escritos de Darwin pero como se alejaban mucho de sus ideas religiosas, no quiso revelarle sus descubrimientos alrededor de la herencia, que posteriormente lo consagraron como el padre de la genética. De todos modos las teorías de Darwin han sido la base

de múltiples áreas de investigación en biología y el avance genético no es la excepción.

En los subsecuentes años a partir de los planteamientos y teorías de Darwin y Mendel se generaron múltiples ramas en la investigación alrededor de la herencia y del material heredable. Se comenzó un rumbo diferente en el que el proceso evolutivo dejó de ser la premisa al igual que el desarrollo embrionario y se inició una cruzada por la búsqueda de los componentes microscópicos. El camino era largo y difícil, pero así se inició la carrera hacia el Proyecto Genoma Humano y el reduccionismo molecular.

Las teorías de Darwin han ocupado un lugar muy importante incluso en los libros de genética moderna, por ejemplo en el libro de Steve Jones *The Language of the Genes*, escribe que lo admirable del viaje de Darwin a América del Sur en el *Beagle*, no es que estuviera interesado en la evolución sino que él sabía que el primer paso para entender al mundo era hacer un mapa del mismo. Para entender la vida hay que dibujar el mapa que la controla, de aquí la importancia de secuenciar el genoma humano para los investigadores que creen que los genes estructuran absolutamente todo. Darwin en sus teorías estaba escribiendo el camino que debía de seguirse en la comprensión de la vida, por esta razón la aceptación de las nuevas corrientes es más difícil ya que la mayoría de los biólogos han seguido el rumbo establecido. El camino hacia el absolutismo genético ya está muy andado, pero es de sabios cambiar de opinión.

En el momento en que fue descubierta la estructura del DNA se inició una búsqueda incansable por comprender el funcionamiento de dicha molécula y de que manera se relacionaba con el resto de la célula. De una manera acelerada, los científicos descubrieron que el papel que tiene el material genético dentro de los seres vivos es enorme y sumamente complejo. Su único problema es tratar de explicar algo complejo como un sistema aislado y considerar a la vida como la simple relación de componentes químicos y físicos, o al DNA y sus múltiples reacciones a nivel celular, como la base y el origen de todos los sistemas vivos. Se considera a la célula como lo más importante, lo demás son detalles.

En este trabajo he hablado de algunos de los investigadores que son los antecesores de las teorías acerca de la dinámica de los seres vivos y su complejidad, en este sentido, Thompson en su trabajo cuestiona la importancia que se ha dado a la célula en el estudio de la forma y el desarrollo; critica la línea que argumenta que la célula es el núcleo del crecimiento, de la nutrición y la fuerza... el centro de todo. Cuestiona la creencia de que el material genético es el núcleo de todas las interrogantes, incluida la forma. Thompson argumenta que la forma de las células debe ser analizada a partir

de considerar que dichas estructuras están dadas por múltiples fuerzas que interactúan para que la materia genere una expresión visible. Habla de la importancia de considerar diversos fenómenos o fuerzas para la comprensión del surgimiento de las formas.

En la incansable búsqueda de fuerzas generadoras de formas vivas, ya podemos hablar de una dinámica en la que intervienen múltiples factores. Thompson estaba en lo cierto, la problemática que criticaba era el principio del camino hacia el reduccionismo molecular. En las ideas de Thompson podemos ver la preocupación por que se le da un mayor peso a las estructuras materiales y no a la dinámica que se genera con su interacción y advierte el peligro de no considerar la complejidad inherente a cada parte de vida en nuestro planeta. El surgimiento de la complejidad como método de estudio ha podido entender que, ni la célula, ni los genes, ni la selección natural, ni las interacciones físicas y químicas son de manera autónoma la base de la vida; es la interacción de las partes la que estructura al conjunto; en las palabras de Thompson “La materia por sí sola no tiene poder de hacer, de crear, o de convertirse: es en la energía donde residen todas estas potencialidades, energía invisiblemente asociada con el sistema material, y en interacción con las energías del universo circundante” (Thompson; 1992).

El control genético es sorprendente, tanto que podemos apantallarnos, pero debemos ver que “la determinación genética no es inamovible, es decir absoluta e irreversible” (Dawkins; 1993). No debemos separar la importancia que tienen otros fenómenos como lo son la evolución, la extinción, la emergencia de formas, el desarrollo embrionario, el medio ambiente y muchas otros fenómenos que se dan como resultado de la interacción y de la autoorganización de la vida, que no han podido ser explicados en base a las leyes establecidas por la genética. De hecho tampoco estas leyes han podido determinar muchas de las características del DNA o cómo interacciona realmente con el medio ambiente.

Podemos pensar que la acción de los genes sobre los organismos es de alguna manera cambiante debido a múltiples factores externos, por lo que al igual que el clima, no podemos predecir con exactitud cuál va a ser la evolución del sistema y el resultado final. Una predisposición no es un hecho, por lo que no podemos asegurar que una persona no se va a enfermar de Cáncer con la corrección de un gen mutado; “la formación de un cuerpo es una empresa cooperativa de tal complejidad que es casi imposible determinar la contribución de un gen diferenciándola de la contribución de otro. Un gen dado tendrá efectos muy distintos en diferentes partes del cuerpo. Una parte determinada del cuerpo puede ser influida por muchos genes, y el efecto de cualquier gen depende de la interacción de muchos otros” (Dawkins; 1993).

En el control del desarrollo embrionario los genes no tienen esa independencia de la que se habla, cooperan de una forma muy compleja con otros genes y a su vez con el entorno. Sin duda se han logrado más avances en la comprensión del desarrollo a partir de la aceptación de una dinámica compleja, que con el determinismo genético.

Estoy conciente de que las ideas nos conducen a momentos en los que pensamos que la línea de conocimiento en la que creemos es lo que va a conducir a respuestas inimaginables, muchas veces descubrir algo es grandioso y el resultado es una serie de exclamaciones aventuradas, como creo que es el caso dentro de la investigación en genética y biología molecular, y es muy probable que suceda lo mismo con el pensamiento complejo, algún día yo misma leeré estas paginas y pensaré que exageré en mis planteamientos, pero supongo que es parte del amor por la ciencia.

El proyecto genoma humano seguramente traerá consigo grandes logros en varias de las direcciones que se ha propuesto abarcar. Sin embargo para realmente comprender los fenómenos que estudia, no sólo requiere describir la relación ordenada y predecible de los componentes materiales, sino también otros fenómenos que están involucrados en el funcionamiento de los sistemas vivos complejos. Debemos considerar que no somos únicamente maquinas moleculares, que estamos en un espacio en el que cada instante es la evolución de uno anterior y el paso a una nueva jerarquía.

La ciencia se encuentra en la era de la investigación “postgenómica”, el problema es saber cual va a ser la ruta a seguir, de que manera nos vamos a acercar al mundo molecular y a los mecanismos genéticos y celulares. En este sentido este trabajo requiere de la inclusión de una propuesta para comprender los mecanismos genéticos involucrados en las extensas redes complejas de los seres vivos. Estas redes, que incluyen al ser humano, funcionan como sistemas dinámicos. Por ello incluyo el enfoque propuesto por Lauffenburger (2000) quien considera a las redes genéticas dentro del marco de los subsistemas modulares. Estos sistemas son tratados como subsistemas complejos de redes moleculares que se estructuran como unidades funcionales que realizan tareas identificables. Los estudios genómicos proponen así un acercamiento al funcionamiento celular que no sólo considera las funciones nucleares sino también sus vínculos con otras redes regulatorias en diferentes niveles jerárquicos tanto en escalas espaciales como temporales.

Los seres vivos no nos alimentamos únicamente de energía y de reacciones metabólicas, también de sueños, de emergencias y contingencias, de orden y caos, de amor y fantasía... ¿existirá el gen de la imaginación y de las ideas individuales?.

Capítulo 5

Discusión

La discusión en un trabajo como este es un poco complicada ya que no se tiene un conjunto de resultados a raíz de un experimento o un análisis de gráficas y estadística, el mismo trabajo se presenta como una discusión de varios puntos que fueron seleccionados de manera no azarosa ni con el objetivo de compilar información, sino que intenté unir varias cuestiones de interés dentro de la biología vistas desde una perspectiva novedosa. En este trabajo he presentado un problema central en la investigación biológica, de hecho un tema nuclear en su historia: el desarrollo y surgimiento de las formas vivas. Sin duda en las páginas precedentes no están escritas todas las respuestas, lo que intenté fue presentar un enfoque, que se acerque más a lo que es la vida y a la manera en la que funciona como un sistema dinámico complejo y adaptativo. A lo largo del trabajo he tratado de no ser dogmática pero seguramente en algunos momentos lo fui ya que creo firmemente en que la vida funciona de manera compleja y por tanto que la investigación debe partir de este principio. La biología necesita una evolución o una revolución de pensamiento y ese para mí es uno de los puntos más importantes en este trabajo.

La biología es una ciencia que se ha desarrollado alrededor del estudio de las formas vivas tratando de comprender los procesos de surgimiento, evolución y funcionamiento en diferentes manifestaciones. Sin embargo el estudio de estos fenómenos se ha enfocado en muchos momentos de la historia del pensamiento biológico de una manera reduccionista y lineal. Esto no ha permitido, a pesar de tantos siglos de investigación y de montañas de información acumulada, alcanzar un conocimiento que nos permita comprender la complejidad de las relaciones entre factores y niveles diferentes que en conjunto constituyen los procesos de generación de vida.

A lo largo de la historia de la biología han aparecido planteamientos de pensadores que se han salido de los patrones impuestos por la ciencia predominante. En este trabajo se rescata a Geoffroy Saint-Hilaire y a D'arcy Thompson, quienes en diferentes periodos desarrollaron sus investigaciones considerando elementos de la complejidad que fueron excluidos de las teorías evolucionistas darwinianas. El primero a finales del siglo XVIII y principios del XIX realizó trabajos que de no haber sido excluidos hubieran constituido una fuerte base del pensamiento evolucionista. Thompson un siglo después retoma las ideas excluidas por los darwinistas cuestionando y proponiendo nuevas líneas de investigación dentro de la biología. En síntesis ambos comparten un vínculo con Charles Darwin, Saint-Hilaire es el padre desconocido y Thompson el hijo desobediente.

Para Saint-Hilaire las formas vivas eran unidades estructurales interdependientes que evolucionaban a partir de arquetipos en base a transformaciones, de modo que diferentes organismos de especies muy distintas se relacionaban a partir de sus semejanzas morfológicas. La importancia de los trabajos de Saint-Hilaire es que con base en sus experimentos planteaba que los seres vivos evolucionan y se transforman a través del tiempo, pero no como lo planteó posteriormente Darwin, como proceso histórico paulatino y sin considerar la interdependencia de los constituyentes morfológicos, sino como dependiente del conjunto de factores y centrado en el desarrollo embrionario, introduce la importancia de los estudios morfológicos y del desarrollo como motores del proceso evolutivo.

D'arcy Thompson dentro de la misma línea, pero en momentos muy distintos, planteó la importancia de las matemáticas dentro de la biología. Para Thompson las formas vivas se desarrollaban y evolucionaban a partir de transformaciones que podían ser descritas en base a matemáticas especiales, las matemáticas de la vida. Sus ideas las ejemplificó mostrando en diferentes especies animales y vegetales la incidencia de formas que siguen patrones matemáticos comunes. Por otra parte comprobó la relación entre especies de diferentes filos mostrando sus transformaciones con sólo aplicar pequeños cambios en un campo matemático. La importancia del trabajo de Thompson, además de mostrar la belleza de las formas vivas, fue la introducción de un nuevo pensamiento que posteriormente se desarrolló en diferentes campos en las teorías en las que se considera a la complejidad como parte inherente de los fenómenos vivos. La relación de las matemáticas y la biología es ahora inseparable, la biología debe de perder el miedo a los números y descubrir el otro secreto de la vida.

A partir de las propuestas de estos disidentes se plantean algunas ideas con relación al problema del surgimiento y desarrollo de las formas vivas a

lo largo del proceso evolutivo y se cuestiona la idea de que dicho proceso es una trayectoria histórica lineal. En realidad esta historia no es más que una continuidad fragmentaria que no considera las importantes relaciones entre los diferentes niveles o jerarquías. Por el contrario el proceso evolutivo, a mi parecer, sigue una dinámica, que como lo propusieron los mencionados autores, es una dinámica en la que se da una continuidad arquetípica pero en constante transformación. A partir de esta continuidad, y mediante la comprensión de los diversos factores que intervienen en el desarrollo de la vida dentro del estudio de los sistemas complejos, es como se llegará a responder muchos de los cuestionamientos que hasta la fecha no han podido ser resueltos. Por ello la ciencia debe de ir más allá de lo establecido y tratar de ver que las relaciones entre los procesos vivos son complejas y que para acceder a su conocimiento es necesario tener en cuenta los múltiples factores y sus interrelaciones.

Considerar la complejidad como punto de partida para comprender los procesos de vida es de gran importancia, y en este trabajo lo es especialmente la articulación entre la evolución y el desarrollo. Se ha plasmado a lo largo del texto la relevancia del proceso de desarrollo como parte fundamental en la evolución. Es así como se genera una nueva área de investigación independiente llamada evo-devo (evolución-desarrollo). En este trabajo evo-devo ha estado presente en cada discusión, a veces indirectamente y aún antes de que se constituyera como una área independiente. A partir de esta línea de pensamiento vemos que la flexibilidad evolutiva que presenta el embrión es el meollo del surgimiento de la diversidad de las formas vivas. La síntesis de estas dos disciplinas considero traerá consigo una gran cantidad de soluciones para iniciar una diferente búsqueda del comienzo, una búsqueda en la que la emergencia de formas será explicada a partir de una dinámica en la que intervienen múltiples factores que interactúan y se interrelacionan para transformar la materia inerte en materia viva.

A lo largo de este trabajo se ha hablado insistentemente de la morfogénesis, de la importancia de la estructura morfológica y la incidencia de su estudio en el pensamiento biológico. Podemos ver que en el proceso de desarrollo de las formas vivas, como proceso complejo, actúan una gran cantidad de “fuerzas” que en conjunto producen la emergencia de muy diversas estructuras. Dicho surgimiento no es la simple consecuencia de un proceso adaptativo, es el resultado de la presencia de múltiples mecanismos que pueden ser comprendidos bajo la perspectiva de los sistemas complejos. La investigación en el área de los sistemas complejos nos permite encontrar patrones estructurales y de comportamiento, accediendo de esta manera a la comprensión de los mecanismos mediante los cuales la vida se desenvuelve.

En este trabajo se plantean algunos de los mecanismos más importantes que intervienen en la formación y evolución de las formas vivas, como lo es la simetría y el papel que juega y ha jugado en la formación de nuestro universo. Para la formación del universo fue muy importante el rompimiento de la simetría y como consecuencia lógica la transformación y evolución de la materia. El rompimiento de simetría está presente en todos los fenómenos biológicos y es la explicación de la presencia de patrones y de la analogía entre patrones. Los rompimientos de simetría son parte de un proceso en el que el resultado es una mayor complejidad, misma que aparece gracias al surgimiento de variedades estructurales que emergen como bifurcaciones a consecuencia de momentos caóticos.

Si no fuera por los rompimientos de simetría todos seríamos sólo esferas y no podríamos ni soñar con una simetría bilateral asimétrica. Sin embargo el rompimiento de la simetría no es el único factor que interviene en la generación de formas vivas, recordemos que existen otros fenómenos identificables como lo es la emergencia que actúa en conjunto con muchos otros fenómenos. La emergencia es una palabra en la que se encierra “el secreto de la vida”, somos emergencias y contingencias, simetrías rotas, hemos surgido pero no de la nada, somos el resultado de una dinámica dentro de un sistema y nos auto producimos, nos autorganizamos.

La materia ha generado una gran cantidad de formas, algunas vivas, pero éstas no han seguido cualquiera o todas las posibles direcciones, las opciones transformadoras no son infinitas, como lo planteó Darwin. Tenemos nuestros límites impuestos por el mismo sistema y es por esta razón que por el estudio de los sistemas complejos es posible encontrar patrones de gran ayuda en la comprensión de los fenómenos naturales.

Una frase muy importante en este texto es: “la materia por si sola no produce nada, no cambia nada, no hace nada” (Thompson; 1992), y la retomo por que me interesa recordar que a pesar de que estamos formados por simples materiales, somos diferentes. No somos, como lo ha considerado la ciencia lineal, una simple conjunción de componentes químicos y físicos, somos además la consecuencia o la emergencia de las existentes propiedades protegidas de la materia. El estudio de dichas propiedades nos habla de que los componentes materiales no tienen establecido o programado el resultado global de un sistema. Por lo tanto la ciencia reduccionista que considera que el acceso al conocimiento tiene que hacerse desmembrando los componentes materiales hasta llegar a lo más indivisible, se está alejando cada vez más de la esencia de la vida y llegará un momento en el que las verdaderas interacciones que se dan como resultado de los fenómenos presentes en los seres vivos, sean imposibles de relacionar.

En este trabajo es de gran interés llamar la atención al camino que ha seguido y sigue la biología dentro de la investigación. Considero que es vital para dicha disciplina tomar en cuenta la complejidad que encierran los fenómenos vivos. No descarto del todo la ciencia reduccionista, en tanto existen dentro de la complejidad fenómenos simples que al ser estudiados en sí mismos es posible alcanzar un nivel de conocimientos básicos, pero propongo la inclusión de métodos en los que dentro de cualquier área de la biología, se considere el pensamiento complejo, como un mecanismo de conocimiento más acorde con las características de las formas vivas.

Además de considerar los rompimientos de simetría, la emergencia, la autoorganización, los protectorados o propiedades protegidas de la materia, existen otros mecanismos que actúan en la generación de formas y patrones, por ejemplo la importancia de los atractores extraños y dentro de estos de los atractores morfogenéticos, quienes limitan los posibles estados de la forma. Con la comprensión de dichos atractores, podemos resolver muchas incógnitas con relación a la presencia de estructuras que de manera repetida aparecen en especies muy diferentes y descartar la historia lineal de la evolución de la vida. Las estructuras no aparecen por razones misteriosas o místicas, siguen caminos modelados por la misma dinámica del sistema, por la relación con muchos otros sistemas interconectados, y desde luego el medio ambiente cumple un papel muy importante en las transformaciones que los seres vivos sufren a través del tiempo.

Dentro de la preocupación que surge a raíz del reduccionismo en las áreas biológicas presenté un problema de gran controversia, el Proyecto Genoma Humano. Dicho proyecto fue incluido ya que es muy importante en un texto en el que se critica el reduccionismo molecular, hablar de uno de los ejemplos más representativos de este reduccionismo. Con este proyecto la biología ha tomado el camino más pretencioso para saber todo acerca de todo en todo, y cree poder hacerlo con sólo la secuenciación del código genético de los cromosomas humanos. Con respecto a este tema planté mi preocupación no tanto por los peligrosos alcances que puede tener el conocer nuestro genoma, sino por la pretensión de llegar a saberlo todo considerando que el DNA es el único motor de vida. En este libro se propone lo contrario, la información genética es parte de un sistema en el que la interacción de las partes es la fuente del surgimiento de las formas vivas. Evocando las palabras de Thompson puedo afirmar que el DNA por sí solo no produce nada, no cambia nada, no hace nada.

La biología debe de acceder a la comprensión de la vida siguiendo un sistema que se acerque más a las complejas redes que se desarrollan como consecuencia de la vida misma y aceptar los diferentes planteamientos, que

gracias a la interacción con otras disciplinas como la física y las matemáticas, ya están teniendo un eco en muchas áreas del conocimiento.

Dentro de los planes educativos a los cuales yo accedí al estudiar biología no se mencionó en ningún momento la existencia de la investigación en sistemas complejos, de hecho la historia oficial sigue siendo reduccionista, lo que como he mostrado ha limitado la evolución del conocimiento de los procesos vitales. Considero que es muy importante que desde todos los niveles educativos se presente a la ciencia como un área en la que hay una evolución de pensamiento y que existe una flexibilidad para reconocer desde diferentes puntos de vista la conjunción de fenómenos complementarios. No todos somos darwinistas, no todos somos anti darwinistas, no todos somos reduccionistas y algunos disfrutamos la vida entre moléculas. Lo que definitivamente considero importante es generar la conciencia de que el proceso teórico para entender la complejidad no es exclusivo de otras disciplinas científicas, sino también es el papel de los biólogos hacer su aporte a estas teorías fundamentales.

La biología necesita generar fundamentos teóricos en base a principios multifactoriales y de interacción recíproca, de manera que alcancemos una mejor comprensión de la realidad que encierra la vida y el surgimiento y evolución de la misma.

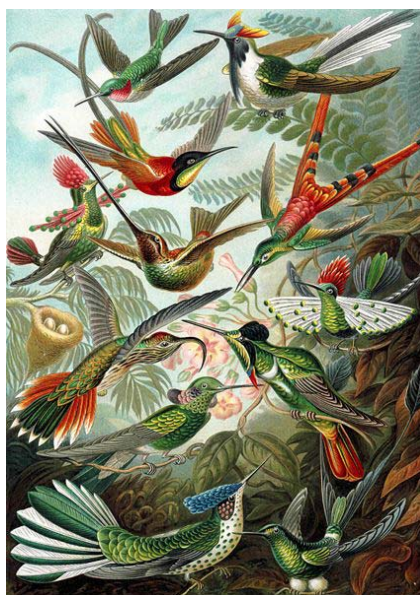


Figura 21. Ilustración que muestra la familia Trochilidae elaborada por Ernst Haeckel en “*Kunstformen der Natur*” (1904). (en www.wikipedia.org).

Bibliografía

- [1] Agustí, Jordi (ed). *La lógica de las extinciones*. Barcelona, Tusquets Editores S.A. 1996.
- [2] Anderson, M. H., Ensher, J. R., Matthews, M. R., Wieman, C. E. & Cornell, E. A. "Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor". (1995) *Science* 269, 198-201.
- [3] Appel, Toby A. *The Cuvier-Geoffroy Debate: French Biology in the Decades before Darwin*. Oxford, Oxford University Press, 1987.
- [4] Bachelard, Gaston. *El compromiso racionalista*. México, Siglo Veintiuno Editores, 1980.
- [5] Brans, Jean Pierre, Stengers, Isabelle y Vincke Phillippe (eds). Ilya Prigogine. *El tiempo y el devenir*. Coloquio de Cerisy. Barcelona: Gedisa. 1996.
- [6] Braun, Eliezer. *Caos, fractales y cosas raras*. México: Fondo de Cultura Económica/ SEP/ Conacyt, 1996.
- [7] Browder, Leon W. *Developmental Biology and Comprehensive Synthesis. A Conceptual History of Modern Embryology*. Vol. 7, New York, Plenum Press, 1991.
- [8] Cela, Conde Camilo J. *De genes, dioses y tiranos. La determinación biológica de la moral*. España. Alianza Editorial, S. A., 1985.
- [9] Cocho Germinal y Miramontes Pedro. "patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectorados". *Ciencias. Revista de difusión*. Facultad de ciencias, UNAM. Núm59. Julio-septiembre 2000. Pp 13-20
- [10] Cuvier en: www.ucmp.berkeley.edu/history/cuvier.html

- [11] Darwin, Charles. *El origen de las especies*. México, Editores mexicanos unidos, S.a., 1999.
- [12] Dawkins, Richard. *El gen egoísta. Las bases biológicas de nuestra conducta*. Barcelona, Biblioteca Científica Salvat, 1993.
- [13] De la Peña, José Antonio. “Azar, arte y computadoras. Las matemáticas y el caos” Universidad de México. Revista de la Universidad Autónoma de México. México, enero 1996 núm. 540 pp. 28-33.
- [14] Dennett, Daniel C. *Darwin's Dangerous Ideas. Evolution and the Meaning of Life*. New York. Touchstone Books by Simon and Schuster, 1995.
- [15] Emmeche, Claus. *Vida simulada en el ordenador. La nueva ciencia de la inteligencia artificial*. Barcelona, Gedisa, 1998.
- [16] Eigen Manfred y Ruthild Winkler-Oswatitsch. *Steps Towards Life. A perspective on Evolution*. New York, Oxford University Press, 1996.
- [17] Farrington, Benjamín. *El evolucionismo. Iniciación a la teoría de las especies*. Barcelona, Ediciones de cultura popular, S.A. 1967.
- [18] Gell-Mann Murray. *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo*. Barcelona, Tusquets Editores, 1998, 4a. Edición.
- [19] Gilbert, Scott F. *Developmental Biology*. Sunderland, Massachusetts, Sinauer Associates, Inc. Publishers, 1988, Second Edition.
- [20] Gleick, James. *Chaos. The amazing Science of the Impredictable*. London, Vintage, 1998.
- [21] Goodman, Corey S. (ed.) “Introduction. The evolution of evo-devo biology” PNAS, April 25, 2000, vol. 97 no. 9: 4424-4425
- [22] Goodwin, Brian. *How the Leopard changed its spots. The Evolution of Complexity*. New York, Charles Scribner's Sons, 1994.
- [23] Gould, Stephen. J. *Leonardo's Mountain of Clams and the Diet of Worms. Essays of Natural History*. New York, Harmony Books. 1998.
- [24] Gould, Stephen. J. *Dientes de gallina y dedos de caballo. Reflexiones sobre historia natural*. Barcelona, Drakontos, Grijalbo Mondadori, 1995.
- [25] Gould, Stephen. J. *Full House. The Spread of Exelence from Plato to Darwin*. New York, three Rivers Press. 1997.

- [26] Hayles, Katherine N. *La evolución del caos. El orden dentro del desorden en las ciencias contemporáneas*. Barcelona. Gedisa Editorial, 1998. 2a. Edición.
- [27] Hernández, Gerardo y Velazco Hernández, Jorge X. *El manantial Escondido. Un acercamiento a la biología teórica y matemática*. México: Fondo de Cultura Económica. 1999.
- [28] Huxley, Julian. *La evolución. Síntesis moderna*. Buenos Aires, Editorial Losada, S.A., 1965. 2a edición.
- [29] Jones, Steve. *The Language of the Genes. Biology, History and the Evolutionary Future*. Hammersmith, London, Flamingo, 1994.
- [30] Kauffman, Stuart A. *The Origins of Order. Self-organization and Selection in Evolution*. New York, University of Pennsylvania and the Santa Fe Institute. Oxford University Press, 1993.
- [31] Lamark en: www.ucmp.berkeley.edu/history/lamark.html
- [32] Lauffenburger, Douglas A. "Cell signaling pathways as control modules: Complexity for simplicity?" PNAS, May 9, 2000. Vol. 97, no. 10: 5031-5033
- [33] Laughlin, R. B., and David Pines. "The teory of Everything". PNAS (2000). 269, 1-31.
- [34] Leakey, Richard y Lewin Roger. *La sexta extinción. El futuro de la vida y de la humanidad*. Barcelona, Tusquets Editores, 1998 2a. Edición.
- [35] Lee, Thomas F. *El proyecto genoma humano. Rompiendo el código genético de la vida*. Barcelona, Gedisa Editorial, 1994.
- [36] Leith, Brian. *El legado de Darwin*. Barcelona, Biblioteca Científica Salvat Editores S.A. 1986.
- [37] Lewin, Roger. *Complexity: Life at the edge of Chaos*. New York, MacMillan 1992.(en español) Complejidad. El Caos como generador del orden. Barcelona, Tusquets Editores, 1995.
- [38] Mainzer, Klaus. *Thinking in Complexity. The Complex Dinamics of Matter, Mind and Mankind*. Berlín, Springer-Verlag, 1994.
- [39] Mair, Ernst. *Una larga controversia: Darwin y el darwinismo*. Barcelona, Crítica (Grijalvo Comercial, S. A.), 1992.

- [40] Margulis, Lynn. *The Symbiotic Planet. A New look at Evolution*. London, Weidenfeld y Nicolson, 1998.
- [41] Miramontes, Pedro. “Predecir el clima es una cosa, predecirlo correctamente es otra” *Ciencias. Revista de Difusión*. Facultad de Ciencias, UNAM, México. julio-septiembre 1998. Pp. 4-11
- [42] Morin, Edgar. *El método. La vida de la vida*. Madrid, Catedra, 1998. 4a edición.
- [43] Morin, Edgar. *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona, Gedisa, 1994.
- [44] Nagel, Ernest. *La estructura de la ciencia. Problemas de la lógica de la investigación científica*. Barcelona, Paidós, 1981.
- [45] Pagels, Heinz R. *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona, Gedisa, 1991.
- [46] Sametband, Moisés José. *Entre el orden y el caos. La complejidad*. México: Fondo de Cultura Económica / SEP / CONACYT, 1999, 2a. Edición.
- [47] Stein, Wilfred D. and Varela, Francisco J. (eds.) *Thinking about Biology. An Invitation to Current Theoretical Biology*. Lecture Notes Volume III. USA, Santa Fe Institute. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [48] Stewart, Ian. *Nature's Numbers. Discovering Order and Patterns in the Universe*. London: Weidenfeld & Nicolson, 1995.
- [49] Stewart, Ian. *Life's Other Secret. The New Mathematics of the Living World*. Harmondsworth, England, Penguin Books, 1999.
- [50] Thom, René. *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de los modelos*. Barcelona, Gedisa, 1997.
- [51] Thompson, D'arcy W. *On Growth and Form*. New York, Dover, 1992.
- [52] Waldrop, M. Mitchell. *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. Harmondsworth, England: Penguin Books. 1994.