

LA OBRA DE STUART KAUFFMAN. EL PROBLEMA DEL ORDEN COMPLEJO Y SUS IMPLICACIONES FILOSÓFICAS

Alfredo Pérez Martínez.

Departamento de Filosofía I. Metafísica y Teoría del Conocimiento. Facultad de Filosofía, Universidad Complutense de Madrid, España.

Resumen

A partir de los años sesenta del pasado siglo, se ha ido incrementando el estudio de los sistemas dinámicos no-lineales, también conocidos como sistemas dinámicos complejos, sistemas adaptativos complejos, o sistemas caóticos deterministas. El impacto del estudio de tales sistemas, en el ámbito filosófico y científico hacia finales del siglo XX y comienzos del XXI, ha sido objeto de un gran debate (Hayles, 1998). Por una parte, hay quienes afirman que: “[...] la ciencia experimenta un cambio radical de perspectiva” [Prigogine 1997, pp. 181]. Por otra parte, hay quienes sostienen que se ha sobreestimado el impacto de las llamadas teorías de la complejidad y el caos. Partiendo de una propuesta muy concreta, el presente trabajo analizará el proyecto que Stuart Kauffman ha desarrollado para reorientar la postura evolucionista más tradicional (neo-darwinista), en torno al problema del orden biológico. Los objetivos principales del presente trabajo son: (1) definir en qué consiste el proyecto Kauffmaniano; (2) determinar su radicalidad y explicar cómo debe ser interpretada; y (3), sobre esta base, distinguir y analizar las implicaciones que para la ciencia y la filosofía tiene dicho proyecto con respecto al problema de la reducción teórica en biología. Por último, a partir de dicha perspectiva nos referiremos a la relación existente entre las ciencias físicas y las ciencias biológicas.

Correspondencia para autores. E-mail:

* jolgonza@filos.ucm.com

El Proyecto Kauffmaniano

Las ya conocidas y populares teorías de la complejidad y el caos han logrado, a partir de la segunda mitad del siglo XX, replantear en diferentes campos del conocimiento problemas que han sido por muchos años foco de atención para la ciencia y la filosofía. Algunos entusiastas seguidores de esta corriente son optimistas en el sentido de afirmar que los nuevos desarrollos conceptuales provenientes de estas teorías ayudarán a la comprensión de problemas fundamentales como son los del origen y la evolución de la vida. El presente trabajo consiste en un análisis del proyecto que Stuart Kauffman (2004, 2000, 1996a, 1996b, 1995, 1993, 1990, 1982, 1970), como uno de los más reconocidos representantes del movimiento en torno al estudio de la complejidad, ha desarrollado para reorientar la postura evolucionista más tradicional (neo-darwinista), sobre el problema del orden biológico. Los objetivos principales son: (1) definir en qué consiste el proyecto Kauffmaniano; (2) determinar su radicalidad y explicar cómo debe ser interpretada; y (3), sobre dicha base, distinguir y analizar las implicaciones que para la ciencia y la filosofía tiene dicho proyecto con respecto al problema de la reducción teórica en biología, así como para la relación existente entre las ciencias físicas y las ciencias biológicas.

Para Kauffman, el tema central de su programa es el orden biológico (1993, 1995). A partir de éste, plantea cuestionamientos, por una parte, concernientes al orden observado en la formación, desarrollo y diversificación de los seres vivos, y, por otra, referentes al orden en la creación de las primeras formas de vida. Este orden biológico es para él un proceso emergente que obedece a leyes fundamentales, pues la selección natural y las variaciones al azar por sí mismas no logran dar cuenta convincentemente del orden observado en la naturaleza. Entonces, partiendo del gran tema que es el orden biológico, Kauffman trata de fundamentar una explicación de éste a partir de una teoría de la emergencia que sea capaz de proponer leyes biológicas elementales, busca generalidades, no detalles. Dichas leyes han de encontrarse en lo que él llama la nueva ciencia de la complejidad. Este campo de estudio investiga fenómenos alejados del equilibrio, caracterizados por sus relaciones no-lineales, sus procesos de realimentación, su alta sensibilidad a las condiciones iniciales, y su capacidad para crear nuevos patrones de comportamiento al encontrarse en un estado entre el caos y el orden llamado *el límite del caos*. En este estado-región, se manifiesta el

fenómeno llamado auto-organización que no es otra cosa que la coordinación del comportamiento complejo del sistema por parte de los elementos del mismo sistema sin estar en presencia de un poder central que regule y dirija la actividad de todos los elementos. Kauffman supone que el origen y la evolución de la vida no son fenómenos graduales y lineales como lo supone el paradigma vigente, por el contrario, los entiende como fenómenos complejos, no-lineales, y alejados del equilibrio. Desde esta perspectiva la auto-organización tiene un papel preponderante en la explicación del origen, mantenimiento, y diversificación de la vida.

El siguiente paso en el proyecto Kauffmaniano es relacionar los principios de auto-organización y selección natural. Para Kauffman no son fenómenos excluyentes, sino complementarios, pero también es cierto que él considera a la auto-organización como una precondition para la capacidad evolutiva, en otras palabras, la selección natural se beneficia de las estructuras estables y resistentes generadas a partir de la auto-organización, aunque tal relación, Kauffman lo acepta, apenas comienza a ser explorada, y preguntas del tipo: ¿cómo pueden tales leyes del orden emergente reconciliarse con las mutaciones aleatorias y la oportunista selección darwinista? y ¿cómo puede la vida ser contingente e impredecible mientras obedece leyes generales?, aún esperan una respuesta. Por último, en el plano más general, Kauffman argumenta que no importa que hablemos de la red auto-catalítica que dio origen a la vida, o de la transformación de una célula en un adulto gracias a las propiedades emergentes de las redes genómicas complejas, o del comportamiento de especies que coevolucionan en un ecosistema que genera pequeñas y grandes avalanchas de extinción y especiación, todos estos fenómenos obedecen a leyes complejas del orden emergente, leyes que están aún en espera de ser descubiertas. Se puede sostener que el proyecto de Kauffman es un lugar de partida, no uno de llegada.

En general, su proyecto se resume en las siguientes ideas centrales: 1) identifica el tema del orden biológico como problema nuclear y punto de partida de su investigación; 2) pretende construir una teoría emergentista que dé cuenta del problema del orden biológico; 3) espera descubrir leyes generales del orden emergente; 4) utiliza las ciencias de la complejidad como fundamento para plantear tales leyes; 5) explora la relación existente entre auto-organización y selección natural; y 6) sostiene que existen leyes fundamentales y complejas

del orden emergente que rigen desde los fenómenos que dieron lugar al surgimiento de la vida hasta la regulación de la biosfera.

La primera gran aportación de Kauffman es sostener que la *vida* es una propiedad emergente que surge cuando la diversidad molecular de un sistema químico prebiótico va más allá de cierto umbral de complejidad. En este sentido, la *vida* no está localizada en las propiedades de ninguna molécula individual (el ADN), sino que es una propiedad colectiva del sistema de interacción de las moléculas. La vida, así, surgió completa, y siempre ha permanecido completa. La vida no está localizada en sus partes, sino en las propiedades colectivas emergentes del todo que ellas crean, y sus componentes son exclusivamente partes físicas.

La otra gran aportación que el proyecto Kauffmaniano hace a la Biología del siglo XXI es la introducción del principio de auto-organización en la explicación de la filogenia. El paradigma neo-darwinista vigente afronta serias limitaciones que pueden ser solventadas si se toman en cuenta los procesos de auto-organización de los sistemas dinámicos complejos. Jacob y Monod demostraron que los genes podían activarse o inhibirse unos a otros, y que tales circuitos genéticos podían tener patrones alternativos de activación para los genes que constituyen las distintas células *tipo* de un organismo. La pregunta central de Kauffman es: ¿cuál es la estructura de tales redes genómicas?, ¿cuáles son las reglas que gobiernan el comportamiento de los genes y sus productos acoplados en las redes de control que gobiernan la ontogénesis? Kauffman ha llegado a la conclusión preliminar de que estas redes, bajo ciertas condiciones, muestran comportamientos estadísticamente esperados. Sus modelos (las redes booleanas) son capaces de mostrar esta característica: existen propiedades estadísticamente comunes de organización en las redes genómicas o estructuras metabólicas, independientes de la selección natural, que sirven de soporte para que opere la selección natural. Estas propiedades típicas de las redes genómicas son posibles gracias a los procesos de auto-organización del sistema. La auto-organización del sistema ocurre en una región cercana al límite del caos; en tal región es donde las correlaciones, y por tanto las variaciones heredables, indispensables para la evolución, son posibles. La capacidad para evolucionar se maximiza en la frontera entre el caos y el orden, y es la selección natural la que alcanza y sostiene este estado de transición posicionado en

el límite del caos. La selección natural maximiza las variaciones heredables. La adaptación es el proceso por el cual se maximiza la capacidad para evolucionar (*evolvability* o *adaptabilidad*), entendida ésta como la cantidad de variación heredable. Dicha adaptabilidad sólo se logra a partir de estructuras auto-organizadas sobre las cuales operan tanto la selección natural como las variaciones heredables. Esta relación entre los principios de auto-organización y selección natural, muestra el trabajo de Kauffman, es el punto nodal que permitirá la ampliación de la teoría evolutiva y marcará el rumbo de la Biología del siglo XXI.

Los planteamientos de Kauffman se pueden resumir en tres hipótesis básicas: 1) el primer sistema viviente surgió a partir de un conjunto auto-catalítico de reacciones que cruzó, en una transición de fase, cierto umbral de complejidad, haciendo posible el auto-mantenimiento y la auto-replicación del sistema, en un rango plausible de tiempo que puede concebirse como aceptable; 2) los sistemas adaptativos complejos se adaptan y evolucionan en un régimen ordenado no muy alejado del *límite del caos*; y 3) la auto-organización es una pre-condición para la adaptabilidad (capacidad para evolucionar o *evolvability*). Esta perspectiva Kauffmaniana indica que los principios de auto-organización y selección no se contraponen, al contrario, se complementan.

El Proyecto Kauffmaniano y sus Implicaciones Filosóficas

Los trabajos de Kauffman tienen, también, implicaciones filosóficas. Por una parte, Kauffman retoma y vuelve a dar impulso a la doctrina emergentista que tiene su inicio en la disputa sobre el origen de la vida a que se entregaron, en el siglo XIX, los defensores de las corrientes vitalista y mecanicista. El emergentismo Kauffmaniano sostiene: *existen leyes fundamentales de organización que permiten el despliegue de nuevas propiedades a partir de sistemas de elementos (materiales) más básicos que cruzan cierto umbral de complejidad. Estas propiedades no son explicables a partir de las propiedades individuales de sus constituyentes ya que son poseídas por el “todo” y, a la vez, influyen sobre ese “todo” organizado.* El emergentismo Kauffmaniano es muy interesante porque, de una parte, resulta, siguiendo a Stephan (2002), completamente compatible con el emergentismo

epistemológico, haciendo posible la tesis del monismo físico, las propiedades sistémicas, el determinismo sincrónico, la novedad, y la impredecibilidad. De otra, puede llegar a identificarse con un emergentismo ontológico, pero es preciso aclarar que tiene limitaciones para hacerlo. Por lo tanto, la defensa del emergentismo ontológico debe mantenerse aún como un problema abierto. La tesis sobre la irreducibilidad es parte fundamental del emergentismo ontológico; los elementos ontológicamente emergentes no son ni reducibles ni están determinados por elementos más básicos. Los elementos ontológicamente emergentes lo son de sistemas que poseen capacidades causales no reducibles a cualquiera de las capacidades causales intrínsecas de las partes. Una propiedad sistémica es irreducible cuando sus capacidades causales no están completamente determinadas por las capacidades causales de las propiedades de los elementos que componen el sistema. Si las capacidades causales del macro-nivel afectan las del micro-nivel, entonces existe alguna *influencia causal descendente* del mismo sistema o de su estructura sobre el comportamiento de las partes del sistema. La irreducibilidad de propiedades implica algún tipo de causalidad descendente: fuerte, media, o débil. La noción de causalidad descendente fuerte es difícil de conciliar con la tesis sobre el monismo físico, por lo cual se considera sospechosamente vitalista. Además, el emergentismo Kauffmaniano no supone ningún tipo de causalidad descendente fuerte, pero, por otro lado, sí acepta un tipo de causalidad descendente débil, esto es: el nivel mayor o macro-nivel no es una sustancia, es un nivel organizacional. Los conjuntos auto-catalíticos y las redes genómicas booleanas concuerdan con esta descripción. Un problema con la causalidad descendente débil es que únicamente se puede hablar de una manera metafórica acerca de un espacio de estados de, por ejemplo, especies biológicas o estados psicológicos. No se pueden especificar tales estados físicamente o aplicar la descripción del espacio de fases en ningún sentido literal. Además, al asumir que el macro-nivel no es una sustancia distinta a la del micro-nivel, sino simplemente una forma o nivel distinto de organización de los elementos que lo constituyen, entonces, los efectos causales pueden ser explicados a partir de los elementos del micro-nivel. Ahora bien, en ese caso, la tesis de la irreducibilidad, en sentido ontológico, no se sustenta. Resultando, así, que el emergentismo del proyecto Kauffmaniano es compatible con el emergentismo epistemológico.

El trabajo de Kauffman no amplía el marco emergentista, y es difícil, por el momento, justificar a partir de éste un emergentismo ontológico, pero refuerza y reorienta claramente el emergentismo epistemológico. En este sentido, a diferencia de sus predecesores [Alexander (1920), Morgan (1923), y Broad (1925)], Kauffman ha ido más allá del debate sobre la mera posibilidad de la emergencia. Su gran aportación a la corriente emergentista es el trabajo que ha desarrollado para describir e interpretar los procesos de organización por medio de los cuales la emergencia de una propiedad es posible. Kauffman, entre otros, ha contribuido al resurgimiento del emergentismo, más que por motivos filosóficos por motivos empíricos, no obstante. A su favor se encuentra la evidencia mostrada en el laboratorio por Lee *et al.* (1996) y Yao *et al.* (1998), sobre la posibilidad de llevar a cabo la auto-replicación de un sistema polipéptido por medio de la auto-catálisis de sus elementos (sin la necesidad de un genoma o enzimas catalizadoras).

El proyecto Kauffmaniano: ¿un cambio de paradigma para la Biología y sus raíces filosóficas?

Kauffman ha utilizado *las ciencias de la complejidad y el caos* como herramientas para plantear su proyecto de investigación, en sus palabras: “estas ciencias pretenden transformar las ciencias biológicas y sociales en los siglos por venir” [Kauffman 1990, pp. 299]. Hayles [1998, pp. 215] argumenta que la teoría del caos representa un cambio de paradigma –en el sentido Kuhniano- porque a diferencia del paradigma Newtoniano, que pone énfasis en aislar la unidad apropiada para comprender los mecanismos que ligan a las unidades en grupos mayores, la teoría del caos busca explicar las regularidades de los sistemas, regularidades que no son explicables a partir del conocimiento del comportamiento de las unidades individuales sino de la comprensión de las correspondencias a través de diferentes escalas y longitudes (geometría fractal). “El supuesto fundamental de la teoría del caos es que la unidad individual no importa” [Hayles 1988, 215]. En este sentido, las explicaciones en términos de estos dos paradigmas no sólo son diferentes, son inconmensurables. Tomando ahora, particularmente, el proyecto Kauffmaniano, su radicalidad y alcance han sido discutidos desde diferentes perspectivas, entre otros, por: Burian y Richardson (1991), Dover (1993), Alberch (1994), Weber y

Depew (1996), Weber (1998, 1999), Richardson (2001), y Castrodeza (2002, 2003). Por ejemplo, Castrodeza resalta el enfoque determinista del proyecto y, a su vez, no rechaza la posibilidad de que la selección natural se puede beneficiar de las leyes complejas o de auto-organización, tal y como lo propone Kauffman (2003).

Weber y Depew [1996, pp. 44] proponen una serie de posibilidades para interpretar el trabajo de Kauffman:

1. Es la selección natural, y no la auto-organización, la que conduce la evolución.
2. La auto-organización restringe la selección natural.
3. La auto-organización es la hipótesis nula contra la cual el cambio evolutivo debe ser medido.
4. La auto-organización es un auxiliar de la selección natural para causar el cambio evolutivo.
5. La auto-organización conduce la evolución, pero es restringida por la selección natural.
6. La selección natural misma es una forma de auto-organización.
7. La selección natural y la auto-organización son dos aspectos de un único proceso evolutivo.

Richardson y Burian (1991), y Richardson (2001), sostienen que el trabajo de Kauffman debe ser interpretado a la luz de las alternativas 6 ó 7, las cuales son, a partir de su análisis, las más radicales. Las alternativas 6 y 7, pero aún más claramente la alternativa 6, nos lleva a entender la selección natural como un caso especial de las propiedades auto-organizativas de la materia. La auto-organización puede darse en sistemas físicos no vivientes, la selección natural, no. A partir de esta postura, la corriente radical –representada, entre otros, por Goodwin (1998)- a favor de la biología del desarrollo (*developmental biology*) está de acuerdo en afirmar que el orden (desarrollo de los seres vivos) observado en la naturaleza es producto de las leyes físicas complejas encontradas en los procesos de auto-organización. Así lo expresa B. Goodwin:

“La “nueva” biología adopta la forma de una ciencia exacta de los sistemas complejos concernientes a la dinámica y el orden emergente. A partir de aquí todo cambia. En

vez de metáforas de conflicto, competencia, genes egoístas o picos dentro de relieves adaptativos, lo que tenemos es una danza evolutiva [...] Es una danza a través del morfoespacio, el espacio de las formas orgánicas”. [Goodwin 2000, pp. 89]

Para Burian y Richardson, como ya se apuntó, el proyecto Kauffmaniano nos lleva hacia una biología del desarrollo o de las formas que se acerca más hacia lo que es una ciencia de leyes, ahora, de la complejidad. Ésta posición radical que describen Burian y Richardson [1991, pp. 284-285], se remonta a la ciencia natural que precedió a los trabajos desarrollados por Darwin: una biología ocupada de clasificar las formas vivientes, esto es, centrada en el estudio de la morfología y el desarrollo de las plantas y los animales. Se aceptaba que las leyes físicas o *leyes de la forma* explicaban las restricciones y posibilidades del desarrollo biológico. En este sentido, proponen Burian y Richardson, el proyecto de Kauffman busca las *leyes de la forma* que explican la generación del orden existente en la naturaleza, pero a diferencia de sus predecesores, las leyes físicas a las cuales él apela son leyes complejas que rigen los procesos de la auto-organización de los sistemas dinámicos complejos. Este punto de vista toma distancia del paradigma evolutivo vigente que tiene por base la teoría sintética (selección-herencia) de la evolución, y a su vez, ésta postura no captura en toda su extensión el proyecto desarrollado por Kauffman, ya que en éste, en ningún momento, se rechaza la selección natural, las variaciones hereditarias, ni las mutaciones en las redes genómicas, para explicar el proceso evolutivo.

Por otro lado, Weber (1999) expone un punto de vista distinto:

“La selección no tiene por qué hacer todo, ni siquiera de una manera gradual, ya que la selección puede ser aliada de la auto-organización para generar orden y organización, algunas veces de una manera global [...] Claramente, la auto-organización tampoco tiene por qué hacerlo todo por sí misma. Ni debería ninguna persona racional esperar que el azar únicamente pudiera generar orden a partir del caos. Debería considerarse la acción conjunta de las tres, en distintos grados, en ejemplos específicos, a fin de generar explicaciones robustas de la emergencia”. [Weber 1999, pp. 600]

Ésta posición más conciliadora y, en apariencia, menos radical, es la que describe con mayor proximidad el proyecto Kauffmaniano, pues lo retoma en toda su amplitud y a lo largo de sus distintos trabajos en el transcurso del tiempo. A diferencia de lo que en una primera aproximación podría parecer, considerar el proyecto Kauffmaniano en estos términos es la forma más ambiciosa de hacerlo.

Si el proyecto es, en los términos anteriormente descritos, lo suficientemente ambicioso y bosqueja la integración de dos corrientes antagónicas de la biología teórica, la pregunta que hay que plantear es la siguiente: ¿puede el proyecto Kauffmaniano catalogarse como una revolución científica en el campo de la biología teórica? Para responder esta cuestión hay que referirse al trabajo desarrollado por Kuhn sobre *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Kuhn define tres características principales que son encontradas en las revoluciones científicas:

1. El rechazo de una teoría (paradigma) vigente por otra incompatible con ésta.
2. Un cambio en los problemas disponibles para el escrutinio científico y en los estándares por medio de los cuales son juzgados estos problemas y sus soluciones.
3. Una transformación en la “imaginación” científica; esto es, la manera en cual se ven, entienden e interpretan los fenómenos que se encuentran en estudio, mejor descrita como una transformación del mundo dentro del cual el trabajo científico es hecho.

Para responder la pregunta anterior es necesario analizar el proyecto Kauffmaniano en términos de los tres criterios anteriormente planteados. Comenzando con el primer criterio, referido al rechazo de una teoría (paradigma) vigente por otra incompatible con ésta, se debería mantener que, en este caso, el paradigma vigente de la biología teórica, a saber, la teoría evolucionista sintética (selección-herencia) o neo-darwinista, debería ser rechazada por el proyecto Kauffmaniano, dado que éste debe ser incompatible o inconmensurable con respecto a la teoría vigente. El proyecto Kauffmaniano no rechaza, sin embargo, la validez del principio de selección natural ni las variaciones hereditarias; por otro lado, la teoría vigente tampoco ha entrado en una crisis interna en la cual algunos de sus supuestos socavan la práctica cotidiana de las actividades normales de resolución de problemas. Pero, aunque no son rechazados, ¿supone esta ampliación de la explicación evolutiva la reconstrucción del campo de la biología a partir de nuevos fundamentos, una reconstrucción que cambia algunos de los campos más elementales de las generalizaciones teóricas? [Kuhn 1963, pp. 85].

Responder esta pregunta no es sencillo, pues aún el estudio de los sistemas complejos está en sus etapas iniciales, y la pretendida nueva síntesis es apenas un bosquejo; pero la respuesta es negativa. Si tomamos como referencia la biología molecular, no hay nada en el proyecto de Kauffman que ponga en duda, por ejemplo, cuál es la función del ADN y el ARN en la síntesis de las proteínas, no queda en entredicho el mecanismo de replicación, ni tampoco echa por tierra la teoría acerca de que los genes pueden influir en la actividad de otros dentro de una red genómica, tal y como lo describieron Jacob y Monod en su momento, por el contrario, retoma ese principio como parte fundamental para el desarrollo de sus modelos de redes booleanas, además, en un sentido más amplio, tampoco rechaza el principio acerca de que todos los seres vivos descendemos de un ancestro común o de un único árbol de la vida (principio fundamental del evolucionismo), ni rechaza el principio fundamental de selección natural. Por lo anteriormente argumentado, se puede afirmar que el proyecto desarrollado por Kauffman no satisface la primer característica descrita por Kuhn.

En lo que atañe a la segunda característica, referida a que una revolución científica supone cambios en los problemas disponibles para el escrutinio científico y en los estándares por medio de los cuales son juzgados estos problemas y sus soluciones, el proyecto Kauffmaniano tiene importantes elementos que deben ser evaluados. El tema central de Kauffman es el de la organización; en su proyecto, la organización involucra los problemas de la *forma (estructura)* y la *función (lo que hace la estructura)*. Estos elementos habían sido privilegiados uno sobre otro, dependiendo del marco teórico asumido: los pre-darwinistas la forma y los post-darwinistas la función. Para Kauffman, la organización no es un problema de unidades; esto es, los elementos, por fundamentales que sean, no son capaces de explicar el comportamiento de un sistema. Estamos frente a un problema de patrones de comportamiento. En ese sentido, su proyecto se distingue del punto de vista de la biología molecular. La organización como punto central de la discusión biológica, desde luego, no es un enfoque novedoso, pero sí lo es la manera en la cual Kauffman lo aborda. La mecánica estadística es la herramienta que le permite identificar los patrones recurrentes de los comportamientos promedio y no los comportamientos individuales, como hace la mecánica clásica. Esta puntualización es importante porque marca la ruta y el marco de

referencia que Kauffman ha tomado para desarrollar su proyecto. Él lo expone de la siguiente manera:

“La esperanza aquí es caracterizar diferentes clases de propiedades del sistema que [...] son típicas y genéricas y que no dependen de los detalles [...] La mecánica estadística nos da nuestro más claro ejemplo del uso de los promedios estadísticos, de ahí, propiedades que son típicas y genéricas se toman como descriptores compactos de un sistema complejo”. [Kauffman 1995, pp. 17]

De aquí resulta la singularidad del enfoque usado por Kauffman para encarar el problema de la organización en biología, por ello, los problemas y las soluciones que de aquí surgen son distintos, por ejemplo, a los de la biología molecular. Kauffman no se pregunta por la química o bioquímica particular de determinado ensamblaje molecular, ni si algunos enlaces químicos muestran mayor estabilidad que otros bajo ciertas condiciones. Su enfoque no está orientado y no resolvería ningún problema de este tipo, digamos, de carácter composicional o a nivel de detalle. Su descripción es a nivel de patrones globales de comportamiento. A partir de esto resulta claro que los criterios para plantear problemas y evaluar soluciones utilizados en el proyecto Kauffmaniano resultan distintos a los empleados por el paradigma neo-darwinista vigente, por tanto, se puede decir que el trabajo desarrollado por Kauffman se ajusta a la segunda característica definida por Kuhn en torno a la estructura de las revoluciones científicas.

La tercer característica es la correspondiente a un tipo de transformación en la “imaginación” científica; esto es, la manera en la cual se ven, entienden e interpretan los fenómenos que se encuentran en estudio, mejor descrita como una transformación del mundo dentro del cual el trabajo científico se realiza. Como lo comenta Richardson [2001, pp. 656] “donde los biólogos neo-darwinistas ven adaptación, Kauffman ve orden emergente o espontáneo, surgiendo a partir de la auto-organización. Donde los biólogos neo-darwinistas ven cambios graduales conducidos por la selección natural, Kauffman ve transiciones de fase entre atractores vecinos”. Pero también es cierto que la biología evolutiva utiliza modelos estocásticos como herramienta de trabajo, al igual que Kauffman lo hace para interpretar sus sofisticados modelos matemáticos que le permiten explicar el comportamiento promedio de los sistemas dinámicos complejos. Planteado así, se puede formular la pregunta: ¿son éstos mundos distintos? Cuando la transición de un paradigma a

otro se ha completado, la profesión cambia su visión del campo, sus métodos, y sus metas. Esta reorientación ha sido descrita como el manejo de un mismo conjunto de datos, pero puestos en un nuevo sistema de relaciones con el cual se crea un marco de referencia distinto; algunos lo describen, también, como un cambio de visión o *gestalt*, pero este razonamiento puede llegar a confundir, ya que los científicos no ven un “algo” como algo “más”, sólo ven “algo”; esto es, no ven ahora un pato como un conejo, ven un conejo, y no otra cosa. Entonces, respondiendo a la pregunta inicial ¿son estos mundos distintos? La respuesta es, definitivamente, no. El proyecto Kauffmaniano plantea, como se explicó en el criterio anterior, nuevos problemas, nuevas soluciones, y nuevas herramientas de análisis que obedecen a cierto nivel o tipo de explicación, pero no vive en un mundo distinto e incompatible al de los biólogos neo-darwinistas.

El proyecto Kauffmaniano, se ha podido apreciar, no se ajusta a los criterios definidos por Kuhn en los puntos 1 y 3 anteriormente descritos con respecto a la estructura de las revoluciones científicas, por lo tanto, respondiendo a la pregunta inicialmente planteada, se puede afirmar que el proyecto Kauffmaniano no puede ser catalogado como una revolución científica de la biología teórica en el sentido Kuhniano. Ahora, si el proyecto de Kauffman no se puede considerar de esta manera, entonces ¿cómo debería ser clasificado?

Se puede explorar otra opción en el trabajo desarrollado por Lakatos sobre los programas de investigación científica. El trabajo desarrollado por Lakatos nos ayuda a entender y plantear el proyecto Kauffmaniano como un programa que tiene sus raíces en la doctrina emergentista, la biología del desarrollo, y la biología evolutiva (las cuales fueron desarrolladas durante el siglo XIX); su proyecto no es una irrupción inesperada acontecida hacia finales del siglo XX que tomó completamente por sorpresa al mundo científico, fue más bien un proceso gradual de avances el que permitió a Kauffman proponer y desarrollar determinados planteamientos en torno al problema del orden biológico. Por otra parte, dado que la metodología de Lakatos principalmente se enfoca a explicar de que manera el conocimiento se incrementa (de manera acumulativa y gradual), y, además, ofrece un criterio de demarcación entre ciencia madura (consistente de programas de investigación) y ciencia inmadura (consistente de ensayos de prueba y error), o lo que es lo mismo un criterio objetivo de demarcación entre lo que es ciencia (conocimiento racional) y lo que no

lo es (conocimiento irracional), poco puede ayudar para responder la pregunta sobre por qué el proyecto Kauffmaniano podría considerarse revolucionario; además, el enfoque de los programas de investigación tiene, al menos, dos limitaciones importantes para nuestro caso particular. Primero, su metodología sólo se aplica a “programas completamente articulados” [Lakatos 1970, pp.174] (aunque puede llegar a ser problemático determinar qué es un programa completamente articulado). Partiendo de este supuesto, el proyecto de Kauffman, como él mismo lo afirma, es apenas el bosquejo de un ambicioso y prometedor programa de investigación, por lo tanto, esta condición lo excluiría de tal análisis. En segundo lugar, como ya se había advertido, ya que el proceso de remplazar un programa de investigación por otro es gradual, puede pasar mucho tiempo antes de que se pueda apreciar que un programa rival explica hechos nuevos. Como lo apreciaron Kuhn y Feyerabend [Lakatos 1970, pp. 175], la metodología propuesta por Lakatos no es de aplicación instantánea, no ayuda, inmediatamente, a distinguir entre un programa progresivo y uno que degenera. Bajo esta óptica es difícil evaluar el proyecto Kauffmaniano, a la luz de los trabajos de Lakatos, de otra manera que no sea el apreciarlo como un proyecto que tiene sus raíces (mas no su desarrollo) en la biología del siglo XIX y que no hizo su aparición abruptamente, como podría pensarse, en la biología teórica hacia finales del siglo XX. Pero esta perspectiva Lakatosiana no es suficiente para explicar el carácter revolucionario –si es que existe- del proyecto Kauffmaniano

Si el proyecto Kauffmaniano no implica una revolución científica en el sentido Kuhniano del término, ni tampoco es, por completo, un programa de investigación progresivo del tipo propuesto por Lakatos, sí ofrece a la biología teórica (y no sólo a ella) un nuevo estilo de razonamiento científico, posiblemente tan revolucionario como lo fueron las técnicas estadísticas que transformaron la ciencia y la sociedad Europea en el siglo XIX. Trabajar dentro de un estilo de razonamiento científico no supone la creencia en ciertas proposiciones al modo Lakatosiano (el núcleo central de un programa), sino más bien implica *la práctica de determinadas maneras de razonar en torno a ciertas proposiciones*. El término “estilo” involucra la práctica, el razonamiento, y la formulación de proposiciones [Kellert 1992, pp. 45]. Dos condiciones son necesarias para que una teoría se califique como un nuevo estilo de razonamiento científico, por una parte, debe introducir nuevos tipos de objetos, evidencias, leyes o principios, y proposiciones; y, por otra, el estilo

de razonamiento debe ser autónomo. Hacking utiliza el término “autonomía” para referirse a dos elementos diferentes de un nuevo estilo de razonamiento. En un sentido restringido, una nueva técnica, al generar y probar proposiciones, es autónoma si puede ser utilizada para explicar algo más (cómo en el caso de la probabilidad y la estadística) [Hacking 1987, pp.53; en Kellert 1992, pp. 46]. Por ejemplo, el razonamiento *dinamista* afirma su autonomía buscando explicar los comportamientos en términos que sean distintos a los mecanismos causales subyacentes, esta forma de razonar es aplicable a muchos otros campos de estudio, distintos a aquel del cual tuvo su origen tal estilo de razonamiento. En un sentido más amplio, Hacking requiere que un estilo de razonamiento pruebe su autonomía de la micro-historia de su nacimiento. Debe persistir, crecer y echar raíces en un contexto institucional más allá de las circunstancias de su origen.

El nuevo estilo de razonamiento científico al que conduce el proyecto Kauffmaniano se refiere a una descripción de los patrones de comportamiento de los sistemas complejos, estudiando la interacción entre procesos que operan en diversas escalas de tiempo, espacio y complejidad organizacional. La clave para tal estudio es entender la relación entre los procesos microscópicos y los patrones macroscópicos. En este sentido, los modelos, principios y proposiciones desarrolladas en el proyecto Kauffmaniano han sido utilizadas más allá de su campo, sin importar que hayan sido desarrolladas para el estudio de la dinámica genética.

Reduccionismo y Antirreduccionismo en Biología y la Relación entre la Ciencia Física y la Ciencia Biológica

El programa reduccionista en biología sostiene que toda biología es reducible, en primer término, a la biología molecular, y en última instancia, a la física. Desde este punto de vista, la biología es un campo temporal de estudio que, eventualmente, será remplazado por la física. El programa antirreduccionista en biología sostiene, por el contrario, que no todos los fenómenos biológicos son reducibles al campo de la biología molecular y, por tanto, al de la física. En este sentido, la biología fija su autonomía con respecto al campo de la física.

Rosenberg propone dos principios que han sido sostenidos para argumentar la autonomía de la biología no molecular con respecto de la biología molecular:

“(1) el principio de la realidad autónoma: Los niveles, unidades, y las clases identificadas en biología funcional son reales e irreducibles porque ellas reflejan la existencia de generalizaciones explicativas objetivas que son autónomas de aquellas de la biología molecular.

(2) El principio de primacía explicativa: Al menos en ocasiones los procesos en el nivel funcional proveen la mejor explicación para los procesos en el nivel molecular”. [Rosenberg 1997, pp. 446]

Para Rosenberg, “estos dos principios suponen un compromiso con la causalidad descendente” [Rosenberg 1997, pp. 464], en otras palabras, “las clases biológicas deben tener propiedades emergentes, y debido a estas propiedades emergentes, deben seguir su propio conjunto de principios causales que no pueden encontrarse en el nivel de sus componentes moleculares” [Laubichler y Wagner 2001, pp.54].

El trabajo de Kauffman no implica un cambio en el estado de la disputa sostenida entre la corriente reduccionista y la antirreduccionista en torno al problema ontológico sobre las capacidades causales de las propiedades biológicas, esto es, no soporta contundentemente el principio de realidad autónoma (aunque tampoco lo descarta por completo), no favoreciendo así a ninguna de las dos corrientes.

Rosenberg [por aparecer] sostiene que una defensa epistémica del debate entre la corriente reduccionista y antirreduccionista encuentra su solución –débil e insatisfactoria para ambas corrientes- al asumir que muchas explicaciones simplemente reflejan limitaciones temporales o antropocéntricas acerca de la indagación biológica. Kauffman no atribuye tales explicaciones a limitaciones en términos del conocimiento humano, sino a que, simple y sencillamente, tales explicaciones reduccionistas no son en todos los casos *útiles*:

“No hay necesidad de una descomposición última tal que todas las demás descomposiciones sean deducibles a partir de ésta, aunque puede haber tal descomposición “última”. Kauffman [1970, pp. 259]. [Énfasis añadido]

Lo que muestra el proyecto Kauffmaniano es que el principio biológico de selección natural actúa sobre la organización espacial de ensamblajes genéticos regidos por principios auto-

organizativos, la auto-organización es solamente una parte de la explicación; por lo tanto, una explicación sobre el origen y evolución de la vida que prescindiera de la selección natural y las variaciones heredables es incompleta, pues resulta evidente que no todos los sistemas físicos complejos que experimentan procesos de auto-organización son capaces de auto-mantenerse, auto-replicarse, reproducirse, y evolucionar. En este caso, una estrategia o metodología reduccionista no es de *utilidad* para *explicar* las condiciones en las cuales se generan los patrones de comportamiento que permiten la existencia de redes genómicas correlacionadas (estructuras en las cuales un estado inicial y un estado posterior modificado están relacionados, permitiendo con esto la existencia de variaciones heredables), esto es, la existencia de vida y su posterior evolución. El antirreduccionismo epistémico sostenido en el proyecto Kauffmaniano *es compatible con el principio de primacía explicativa* ya que los procesos en el nivel funcional proveen la mejor explicación para los procesos en el nivel molecular, o expresado de otro modo, la dinámica de los comportamientos globales de los elementos del sistema provee una mejor explicación que aquella que deriva del conocimiento individual de los constituyentes elementales; sus modelos sobre conjuntos auto-catalíticos y redes genómicas son un claro ejemplo de ello.

“Los organismos son “todos” organizados que no tienen “partes” definidas *a priori*. Cualquier identificación de partes causalmente relevantes (tales como las células o las moléculas) es una decisión informada por parte de los investigadores que idealmente refleja una selección de objetos que es dependiente del contexto de los procesos biológicos mismos. De aquí, tenemos que justificar en cada ejemplo si un objeto particular, tal como una molécula específica o un gen, realmente desempeña un rol útil dentro de una explicación mecanicista. En muchos ejemplos, las moléculas son las entidades relevantes, por ejemplo, en la explicación de los metabolismos celulares, pero asumir *a priori* que ellos siempre tienen que ser los niveles relevantes de descripción es adoptar una posición metafísica contraria a la propia conducta científica [...]”. [Laubichler y Wagner 2001, pp. 60]. [Énfasis añadido]

La nueva síntesis bosquejada en semejante programa, entre una biología evolutiva (de accidentes históricos) y una biología del desarrollo (de procesos repetitivos de organización), tiene implicaciones para el problema del reduccionismo en biología, y, a su vez, para la relación entre la ciencia física y la ciencia biológica. Por un lado, el reduccionismo y antirreduccionismo en biología, en tanto que son metodologías para proveer explicaciones, serán de mayor o menor utilidad a tal propósito en función de un problema, una serie de preguntas y una práctica de investigación concreta. Este

pragmatismo explicativo establece una relación entre las preguntas y las respuestas ofrecidas en el contexto de las creencias de un investigador. Tales creencias reflejan en verdad las presuposiciones de los investigadores, quienes, en conjunto, determinan la calidad y el valor explicativo de diversas respuestas sobre la base de una rigurosa y juiciosa justificación. Por el otro, en un plano muy general, la síntesis que ha bosquejado Kauffman entre la biología del desarrollo y la teoría evolucionista neo-darwinista pretende relacionar dos principios fundamentales: el de la auto-organización de los sistemas físicos y el de la selección natural de los sistemas biológicos. Esta posición, lejos de dividir los campos de la física y de la biología, o de pretender reducir la biología a la física o a la química, conecta ambos campos para poder explicar el orden y el desarrollo de los seres vivos. En este sentido, el nuevo estilo de razonamiento científico que distingue al proyecto Kauffmaniano, por un lado, ayuda en el ámbito de la práctica científica a poner menos énfasis en las divisiones disciplinares. Y esto es fácil de explicar, ya que su proyecto no está enfocado hacia el estudio de las particularidades físicas, químicas, o biológicas de los sistemas, sino hacia los patrones globales de relación y organización. Desde esta perspectiva, para el estudio de la forma y la función de los seres vivos (o sistemas adaptativos complejos) es indispensable mantener una estrecha relación explicativa entre la física y la biología, y no una bien delineada autonomía.

BIBLIOGRAFÍA

Alberch, P. (1994): "Review of *The Origins of Order*", *Journal of Evolutionary Biology* 7, pp. 518-519

Alexander, S. (1920): *Space, Time, and Deity*, 2 vols., London, Macmillan

Broad, C.D. (1925): *The Mind and Its Place in Nature*, London, Routledge & Kegan Paul. Reimpresión disponible en: <<http://www.ditext.com/broad/mpn/mpn.html>>

Burian, R. M., Richardson R. C. (1990): "Form and Order in Evolutionary Biology: Stuart Kauffman's Transformation of Theoretical Biology", *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, pp. 267-287

Castrodeza, C. (2002): *Los Límites de la Historia Natural: Hacia una Nueva Biología del Conocimiento*, Madrid, Akal

----- (2003): *La Marsopa de Heidegger*, Madrid, Dykinson

Dover, G. (1993): "On the Edge", *Nature*, 365, pp. 704-706

Goodwin, B. (2000): "La Biología es una Danza", en J. Brockman (ed.), *La Tercera Cultura: Más allá de la Revolución Científica*, Barcelona, Tusquets, pp. 89-102

----- (1998): *Las Manchas del Leopardo: La Evolución de la Complejidad*, Barcelona, Tusquets

Hacking, I (1987): "Was there a Probabilistic Revolution 1800-1930?", in L. Krüger, L.J. Daston, M. Heidelberger (eds.), *The Probabilistic Revolution vol.1*, Cambridge, MIT Press, pp. 45-55

Hayles, K. (1998): *La Evolución del Caos*, Barcelona, Gedisa

Kauffman, S. A. (2004): "The Ensemble Approach to Understand genetic Regulatory Networks" *Physica A*, 340, pp. 733-740

----- (2000): *Investigations*, New York, Oxford University Press

----- (1996a): *Investigations*, SFI, Working Paper. Disponible en: <<http://www.santafe.edu/sfi/People/kauffman/Investigations.html>>.

----- (1996b): "Self-Replication: Even Peptides do it", *Science*, 382 (6591), pp. 496-497

----- (1995): *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, New York, Oxford University Press

----- (1993): *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford, Oxford University Press

----- (1990): "The Science of Complexity and the "Origins of Order"", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, pp. 299-322

----- (1982): "Filling Some Epistemological Gaps: New Patterns of Inference in Evolutionary Theory", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1982-2, pp. 292-313

----- (1970): "Articulation of Parts Explanation in Biology and the Rational Search for Them", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1970, pp. 257-272

Kellert, S. H. (1992): "A Philosophical Evaluation of the Chaos Theory "Revolution"", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1992 (2), pp. 33-49

Kuhn, T.S. (1963): *The Structure Of Scientific Revolutions*, Chicago, University of Chicago Press

Lakatos, I. (1970): "Replies to Critics", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1970, pp. 174-182

Laubichler, M. D., Wagner, P. G. (2001): "How Molecular is Molecular Developmental Biology? A Reply to Alex Rosenberg's Reductionism Redux: Computing the Embryo", *Biology and Philosophy*, 16, pp. 53-68

Lee, D. H., Granja, J. R., Martínez, J. A., Severin, K., Ghadiri, M. R. (1996): "A Self-Replicating Peptide", *Science*, 382 (6591), pp. 525-528

Morgan, C. L. (1923): *Emergent Evolution*, London, Williams and Norgate

Prigogine, I. (1997): *¿Tan Sólo una Ilusión?: Una Exploración del Caos al Orden*, Barcelona, Tusquets

Richardson, R. C. (2001): "Complexity, Self-organization and Selection", *Biology and Philosophy*, 16, pp. 655-683

Rosenberg, A. (1997): "Reductionism Redux: Computing the Embryo", *Biology and Philosophy*, 12, pp. 445-470

----- (2001): "Reductionism in a Historical Science", *Philosophy of Science*, 68 (2), pp. 135-163

Rosenberg, A., Kaplan, D.M. (Por aparecer): "How to Reconcile Physicalism and Antireductionism about Biology", *Philosophy of Science*

Stephan, A. (2002): "Emergentism, Irreducibility, and Downward Causation", *Grazer Philosophische Studien*, 65, pp. 77-93

Weber, B.F. (1998): "Origins of Order in Dynamical Models", *Biology and Philosophy*, 13, pp. 133-144

----- (1999): "Irreducible Complexity and the Problem of Biochemical Emergence", *Biology and Philosophy*, 14, pp. 593-605

Weber, B.F., Depew, D.J. (1996): "Natural Selection and Self-Organization", *Biology and Philosophy*, 11, pp.33-65

Yao, S., Ghosh, I., Zutshi, R., Chmielewski, J. (1998): "Selective Amplification by Auto- and-Cross-Catalysis in a Replicating Peptide System", *Nature*, 396, pp. 447-450