# Auto-organización y autopoiesis

*Arantzazu Etxeberria Agiriano y Leonardo Bich*
*Modo de citar:*
*Etxeberria Agiriano, Arantzazu y Bich, Leonardo. 2017. "Auto-organización y autopoiesis". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck.*
*URL=http://dia.austral.edu.ar/Auto-organización_y_autopoiesis*

El prefijo “auto” en autoorganización y autopoiesis se refiere a la existencia de una identidad o agencialidad implicada en el orden, organización o producción de un sistema que se corresponde con el sistema mismo, en contraste con el diseño o la influencia de carácter externo. La autoorganización (AO) estudia la manera en la que los procesos de un sistema alcanzan de forma espontánea un orden u organización complejo, bien como una estructura o patrón emergente, bien como algún tipo de finalidad o identidad autoconstruida.

En este trabajo nos ocupamos del concepto de AO en el contexto de la problemática sobre la naturaleza de la vida y de los organismos vivientes. Este concepto se elabora en diferentes tradiciones científicas y filosóficas, a partir de su origen en la filosofía kantiana. La cibernética trata de emular la organización de los seres vivos y su teleología mediante la construcción de máquinas; desarrolla una perspectiva centrada en la regulación y en la causalidad mutua entre componentes del sistema. Estos trabajos, a veces complementados con la teoría de sistemas y la teoría de la información, son fundamentales para el desarrollo de la ciencia del siglo XX, especialmente las ciencias computacionales y la biología. Una segunda corriente surge desde la termodinámica de los procesos irreversibles alejados del equilibrio a partir, entre otros, de los trabajos de la escuela de Bruselas, en la que la AO se explora como la formación espontánea de estructuras de orden disipativo. Una tercera tradición, tal vez la más profundamente kantiana, se desarrolla en el contexto de la biología del desarrollo e integra a las dos mencionadas previamente, pues combina aspectos de las dos previas en el desarrollo ontogenético. Podemos decir que cada una de estas concepciones de la AO se relaciona con modelos paradigmáticos diferentes.

La noción de autopoiesis (AP), por su parte, fue propuesta en los años 70 por los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela para explicar la organización individual de los seres vivos como un proceso dinámico que genera una identidad desde las operaciones del sistema (Maturana y Varela 1973). Puede decirse que hereda y reorganiza ideas de la tradición de la AO, especialmente la kantiana y la cibernética, para proponer una teoría biológica alternativa. El enfoque autopoiético concibe el fenómeno de la vida y a los seres vivos de forma muy diferente a la teoría de la evolución o la biología molecular que constituían las líneas de investigación predominantes en la biología de su tiempo. La teoría subraya como propiedad básica de un sistema viviente su autoconstitución dinámica como unidad dotada de identidad a partir de interacciones entre sus componentes. Sin embargo, aquellas propiedades de la vida consideradas primordiales en el enfoque darwiniano, como la reproducción o la evolución, se ven como secundarias, pues requieren de la existencia previa de sistemas autopoiéticos.

El objetivo de esta voz es examinar diferentes aspectos que configuran las tradiciones autoorganizativa y autopoiética, en especial las tensiones conceptuales internas que permiten comprender los desafíos a los que se enfrentan ambas en el marco de la filosofía y la teoría de la biología, así como la forma en que sus posiciones e intuiciones contrastan con otras perspectivas en biología.

## 1 El concepto de auto-organización ↑

El término autoorganización aparece por primera vez en la *Crítica del juicio* de Immanuel Kant (Kant 1790/1973), usado como adjetivo (*selbst-organisiert*) para referirse a los organismos caracterizados como fines de la naturaleza (*Naturzwecke*), es decir, dotados de una finalidad intrínseca. Kant considera que, aunque normalmente las causas de

la existencia de un sistema son externas e independientes de la actividad del sistema mismo, los seres vivos se distinguen de otros tipos de sistemas naturales por el hecho de que sus causas son internas, en el sentido de que dependen del mismo sistema que éstas contribuyen a generar (Kauffman 2000; Fox Keller 2008a, b; Karsenti 2008, Van de Vijver 2006, Toepfer 2011, Weber y Varela 2002). Dice Kant que los sistemas vivos son entidades organizadas teleológicamente cuyos componentes son mutuamente dependientes entre ellos y del todo que generan. Con esta conceptualización, Kant sitúa las bases para una comprensión de los seres vivos como teleológicos y autoorganizados, pero simultáneamente establece un concepto límite para la ciencia, ya que encuentra dificultades para reconciliar la teleología intrínseca de los sistemas biológicos con el marco conceptual desarrollado para las ciencias naturales en la Crítica de la Razón Pura (1781/1978) fundado en leyes naturales sin finalidad, en causas externas y en principios mecánicos (Nuño de la Rosa y Etxeberria 2010).

A partir del siglo XIX el sustantivo 'autoorganización' empieza a usarse en diferentes ámbitos, y Keller mantiene que, desde Kant, da lugar principalmente a dos grandes reconceptualizaciones (Keller 2008, 2009). La primera, debida a la cibernética desde mediados del siglo XX, trata de entender cómo los sistemas artificiales construidos mediante ingeniería humana pueden autoorganizarse para adquirir propiedades semejantes a las de los seres vivos. La segunda aparece en la física y termodinámica de la década de 1960 y se refiere a la formación de patrones de carácter espontáneo en ciertos materiales. En este caso, la AO aparece como un proceso dinámico en el que las partes de un sistema se aúnan para formar una estructura global ordenada sin que el resultado haya sido diseñado o prefijado por una instancia externa. Una tercera contribución a esta línea de investigación es la aportada por la biología del desarrollo que, a partir de los trabajos de Nicolas Rashevsky, Alan Turing, Conrad Hal Waddington y Paul Weiss, aplicó estos conceptos al estudio de los procesos embrionarios que están en la base de la estabilidad del desarrollo y de las formas biológicas. Debido a estas diferentes procedencias e intereses asociados, el concepto de AO se ha usado de forma polisémica en las ciencias experimentales y en filosofía.

En una de ellas, la AO se entiende en un sentido fuerte, como teleología o finalidad intrínseca, mientras que la dirigida al estudio de la emergencia de patrones puede considerarse un sentido más débil, puesto que no se asocia con las propiedades necesarias de los seres vivos sino con la formación espontánea de orden dinámico (Moreno 2004). Aunque a partir de los trabajos de von Bertalanffy de la década de 1930 hasta los de Prigogine de 1960-1970 en la tradición termodinámica, un ser vivo se comprende como un "orden jerárquico de sistemas abiertos que se mantienen a sí mismos" (von Bertalanffy 1949/52), la AO en el sentido débil no presupone la necesidad de una organización circular como la tradición teleológica fuerte o kantiana.

La noción kantiana de teleología no hace referencia ni a la intención ni a la utilidad, sino a la relación entre todo y parte que se produce en el interior de los organismos: un organismo es un fin natural en el sentido de que es "tanto la causa como el producto de sí mismo" (§ 64). Las partes orgánicas sólo son posibles a través de su relación con el todo, es decir, tienen funciones como contribuciones al todo. Esta definición de fin se aplica también a artefactos como los relojes, donde las partes cumplen una función en el todo. Pero a diferencia de lo que sucede con las partes de un reloj, las de un organismo son, recíprocamente, causa y efecto de su forma, así los organismos son totalidades *auto*-productoras que no requieren de ningún agente externo (Nuño de la Rosa y Etxeberria 2010).

Kant no creyó que pueda haber una explicación científica naturalista de los seres vivos a la manera de la física: "Es absurdo esperar que un día pudiera surgir un segundo Newton que hiciera inteligible la producción de una simple hoja de hierba de acuerdo con las leyes de la naturaleza, sin que sus mutuas relaciones no fueran dispuestas por alguna intención" (§ 75). A partir de esta negación kantiana de que esta comprensión del organismo como sistema autoorganizado pueda convertirse en objeto de indagación científica, la AO constituye un desafío considerable, pues los esfuerzos naturalizadores en busca de modelos o explicaciones científicas de las capacidades autoorganizativas materiales se criticarán por considerarlos reduccionistas y suscitan dudas sobre cómo van a capturar el estatus especial de los seres vivos frente a los sistemas inanimados o artificiales. Al mismo tiempo, como veremos, el proyecto de estudiar las capacidades autoorganizativas como base espontánea de orden y organización en sistemas ha resultado ser un proyecto de investigación interdisciplinar atractivo y fructífero, continuado actualmente por la biología de sistemas (Boorgerd et al. 2007, Green 2016, Feltz et al. 2006).

# 2 Auto-organización como regulación sistémica ↑

Los conceptos de retroalimentación, o *feedback*, regulación, homeostasis y cibernética han dado forma a una concepción sistémica de la AO que constituye un intento científico de naturalizar la teleología, aunque sea discutible hasta qué punto lo logra. En cualquier caso los modelos producidos han sido cruciales en el desarrollo de la ciencia de los siglos XX y XXI.

## 2.1 Medio interno y concepto de homeostasis ↑

Una de las tradiciones autoorganizativas parte de la fisiología de Claude Bernard (1865) y se desarrolla en el trabajo de Walter Cannon (1939) y en la cibernética de Wiener y Ashby. Claude Bernard quiso desarrollar una fisiología naturalista y científica sin renunciar a entender a los organismos como entidades hasta cierto punto independientes de su entorno, debido a que gobiernan o mantienen un medio interno (*milieu interieur*) que les permite regular sus procesos básicos separados del entorno exterior de "fenómenos cósmicos". La noción de medio interno permitió a Bernard desarrollar teóricamente una especie de compromiso para desarrollar la fisiología en el contexto del naturalismo heredero de la revolución científica, sin renunciar a postular que hay una diferencia entre seres vivos e inanimados. Así pues, con los organismos mantienen constante el medio interno, de forma que los procesos vitales suceden en gran medida en contacto con ese entorno protegido de los cambios exteriores. Puesto que los conceptos de estabilidad, equilibrio y fijeza fueron cruciales en la ciencia del siglo XIX, Bernard pudo tener influencias de autores como Spencer o Fechner, preocupados por esta cuestión, para diferenciar lo vivo de lo no vivo (Keller 2008), especialmente en el caso de los animales[1]. El medio interno constante amortiguaría el impacto de las alteraciones provocadas por la influencia desfavorable del medio externo y concede a los organismos cierta independencia en relación al mismo, aunque en realidad ambos medios interaccionen continuamente y de ello dependan los fenómenos de la vida. Por tanto, Bernard introduce instrumentos conceptuales para desarrollar desde el punto de vista científico aquel enfoque teleológico tan problemático para el marco Kantiano (Mossio y Bich 2014). Mediante la distinción entre leyes naturales, comunes a todos los fenómenos, y los *milieux*, que proporcionan condiciones de contorno locales, posibilita que *milieux* diferentes pueden albergar fenómenos cualitativamente diferentes sin contradicción con las leyes generales (Bernard 1865, 127-128; Bich 2012a).

Inspirado por el trabajo sobre el medio interno de Claude Bernard, Walter Cannon acuñó el término "homeostasis" para referirse a los procesos mediante los que el organismo mantiene la constancia de sus funciones y los elementos que participan en ellas para preservar la vida. Cannon (1929, 400) insiste en que la homeostasis es más compleja que un mero equilibrio físico-químico, entendido como un balance de las fuerzas que se da en sistemas cerrados, ya que tiene que ver con las condiciones fisiológicas, y no meramente físicas, en las que se basa la constancia. Son las reacciones fisiológicas coordinadas para mantener los estados estacionarios del cuerpo lo que Cannon llamó homeostasis; éstos no son estáticos sino dotados de una alta variabilidad. Por otro lado, Cannon fue más allá que Bernard: no entendió la homeostasis como una mera resistencia a cambios causados por el medio externo, sino que el propio organismo genera ajustes mediante sus mecanismos de regulación y adaptación. En otras palabras, Cannon insiste en que los organismos son estables porque son modificables, pueden automodificarse para adaptarse. Si según Bernard la medicina busca las leyes del cuerpo sano y enfermo para intervenir en él de forma que se puedan prever y modificar estados patológicos del organismo, Cannon incorpora además en la noción de homeostasis la idea hipocrática de que el cuerpo se cura por sí solo de las enfermedades que puedan sobrevenirle (*vis medicatrix naturae*), gracias a esa capacidad o esfuerzo natural por mantener la estabilidad.

El concepto de homeostasis fue una influencia importante para la cibérnética de Wiener, con quien Cannon coincidió en Harvard.

## 2.2 Cibernética y Cibernética de Segundo-Orden ↑

Cibernética es el nombre que Norbert Wiener acuñó para un nuevo concepto de ciencia (en las conocidas Conferencias Macy de 1946-1953), deriva de la palabra griega *kybernetes* y se refiere al control o al gobierno de un sistema. Esta disciplina está en el inicio de desarrollos científicos importantes como la computación digital, la teoría de la información, las redes neuronales, la teoría de los servomecanismos o sistemas con retroalimentación (además de trabajos en otras áreas como psicología, psiquiatría, teoría de la decisión y ciencias sociales). Trató de construir o describir formalmente sistemas artificiales (máquinas o mecanismos) que exhiban los comportamientos autoorganizados propios de los seres vivos, como la capacidad de responder a perturbaciones, desde la lógica u organización interna del sistema. Dio lugar a gran diversidad de aplicaciones surgidas para la investigación de los comportamientos adaptativos. Así, el servomecanismo es un dispositivo ingenieril que reacciona para cancelar las fluctuaciones de su entorno, la retroalimentación (*feedback*) negativa, es un mecanismo de realización de la homeostasis de una variable o proceso, de forma que su valor se modifica en relación a sus resultados o efectos. Este mecanismo clave de la teoría del control se ha convertido en un concepto familiar aunque inicialmente chocaba con la tendencia a comprender la operación de los mecanismos mediante pasos secuenciales (Bechtel y Richardson 2010). Su uso suele referirse al regulador de Watt para la máquina de vapor, analizada por Maxwell, aunque se generalizó con los trabajos de la cibernética, en los que se reconocía la labor pionera de C. Bernard y W. Cannon, y se trataba la retroalimentación negativa como el proceso mediante el que un sistema regula su comportamiento, reduciendo fluctuaciones en el mismo, o mantiene algún estado estable porque alguna función del output o respuesta de un sistema o proceso se realimenta como input o entrada. Por ello, la cibernética reivindica explícitamente la dimensión teleológica de los mecanismos homeostáticos[2] (Rosenblueth et al. 1943).

Dentro de lo que se ha llamado la “primera cibernética”, el psiquiatra británico Ross Ashby es considerado uno de los fundadores tanto de la Cibérnetica como de la Teoría General de Sistemas. La cibernética busca una caracterización “esencial” de máquina, en la que las consideraciones de materialidad y de energía sean irrelevantes y lo que importe sea la regularidad del comportamiento. El problema central de Ashby (1956, 1962) es la estabilidad de un sistema dinámico, cómo puede mantener sus variables esenciales (seguir vivo) ante las perturbaciones externas, como un asunto de adaptación. La máquina que construyó, el *homoestato*, era un ejemplo de adaptación en este sentido. Ashby se basa la regulación y control en mecanismos jerárquicos internamente diferenciados, con subsistemas de control independientes que explican el comportamiento regulativo. Tras un análisis de diferentes reguladores y sus controles, Ashby propone una propiedad de la eficiencia que consiste en el control de las causas y no de los errores (Conant y Ashby 1970). Ashby dijo también que un regulador, o subsistema del mismo, debe tener por lo menos tantos estados posibles como el entorno o los otros subsistemas con los que ha de actuar. Es la *ley de variedad requerida* acerca de la complejidad precisa para que un sistema pueda relacionarse con su entorno (Bich y Arnellos 2012; Cariani 2009).

La principal aportación de la llamada *Cibernética de Segundo-Orden* fue una epistemología de los seres vivos para entender los sistemas autoorganizados como “observadores” de su entorno, y no meramente como sistemas observados (algunos de sus trabajos más importantes se recogen en Heinz von Förster 1960; von Förster y Zopf 1962; Yovits y Cameron 1960; *Cahiers du CREA* 1985). Heinz von Förster establece el principio del orden a partir del ruido, según el cual la AO es facilitada por perturbaciones aleatorias o ruido, que permiten que el sistema explore una gran variedad de estados en el espacio de estados y llegue a una cuenca de atracción fundamental o un atractor más profundo. Otro concepto fundamental para la cibernética de segundo orden es la circularidad; el sistema aparece como organizado en componentes discretos de forma que las relaciones funcionales entre estos definan al sistema y lo distingan del contexto del entorno. La circularidad se postula en los sistemas observados, en la relación de estos con la persona observadora, y en las propias descripciones o explicaciones, que tienden a ser circulares. La AP es heredera de este enfoque particular de la cibernética.

## 2.3 AO en sistemas artificiales y sociales ↑

La noción de AO desarrollada por la cibernética clásica y de segundo- orden contribuyó a la transformación de la

Inteligencia Artificial (IA) clásica, centrada en modelos de cálculo secuencial como la *máquina de Turing,* en modelos de operación paralela y distribuida como los conexionistas. En los años 40 McCulloch y Pitts aplicaron la lógica simbólica para describir el funcionamiento de sistemas semejantes a las redes neuronales y demostraron que todos los procesos que pueden describirse mediante un número finito de expresiones finitas pueden ser efectuados por medio de redes de "neuronas formales". Más tarde el *Perceptrón* de Rosenblatt mostró que las redes de McCulloch-Pitts pueden entrenarse para clasificar conjuntos de patrones. En la década de 1980 la eclosión de los sistemas conexionistas impulsó muchos tipos de modelos de redes para estudiar la formación de estructuras de los seres vivos como sistemas autoorganizados, además de los modelos cognitivos. Un sistema conexionista está formado por un conjunto de unidades simples conectadas mediante operadores lógicos o físicos, con una regla de evolución de estados y conexiones sobre parámetros locales. Se han usado para modelar sistemas prebióticos, evolutivos, redes neuronales, sistemas inmunes, ecosistemas, sociedades, y sistemas económicos. En cada uno de estos dominios, las redes recogen aspectos propios de los fenómenos para los que fueron ideadas, pero el estudio abstracto de sus características, aunque simplifique ciertas propiedades, descubre una inspiración común basada en la auto-organización como emergencia.

Los autómatas celulares constituyen también un modelo clásico de red ideado hacia 1948 por von Neumann con la intención de construir materialmente una máquina auto-reproductiva. Un autómata celular es un tablero n-dimensional en el que cada posición o "célula", que puede hallarse en dos o más estados posibles, está ocupado por una máquina simple. Todas las máquinas son idénticas, y llevan a cabo la misma función de transición que calcula su estado siguiente tomando como argumentos el estado actual y el de las células vecinas. Los autómatas celulares han sido usados para modelar numerosos sistemas físicos y biológicos compuestos por un gran número de componentes homogéneos y que interactúan localmente entre sí y dan lugar a patrones emergentes.

La Vida Artificial (VA), el campo de estudio de los seres vivos que trata de ampliar la metodología usada por la biología teórica mediante el recurso a los materiales y entornos alternativos en los que plantear experimentos, se inspira en los sistemas auto-organizativos para estudiar y emular diferentes procesos complejos de los seres vivos. Se origina en los años 80 con el fin de impulsar una ciencia universal de la vida mediante la síntesis, en contraste con el análisis, de los fenómenos estudiados en los ordenadores y en otros medios. La VA trata de caracterizar la vida-como-puede-ser, de más amplio alcance que la vida-que-conocemos, esfuerzo que se origina en una concepción de la AO de carácter formalista o funcionalista, lo cual origina un importante debate sobre la materialidad de los procesos de los seres vivos que es tema filosófico común con respecto a las capacidades autoorganizativas (ver Moreno et al. 1994).

El concepto de AO se ha aplicado también en colonias y sociedades de insectos para explicar fenómenos globales a escala colectiva en base al comportamiento simple de muchas unidades de forma descentralizada. En estos modelos, ninguno de los participantes dirige la realización del fenómeno, el orden del sistema es un efecto global de su dinámica autoorganizativa. La AO de colonias de insectos como hormigas o abejas ha sido estudiada en biología y en *Vida Artificial* mediante simulaciones y grupos de robots. El comportamiento colectivo está a menudo mediado por formas de comunicación indirecta estigmérgica, mediante emisión de sustancias en el entorno que sirven para coordinar el comportamiento del grupo (Camazine et al. 2003). También se sugiere que habría una propiedad de homeostasis en la organización de las construcciones realizadas por los insectos sociales, Turner (2002) considera que estos procesos autoorganizativos son importantes en biología para complementar las explicaciones selectivas en la evolución.

## 3 Auto-organización como emergencia de patrones ↑

A partir de los trabajos de la escuela de Bruselas, la AO se entiende como una reducción espontánea de entropía en un sistema dinámico (Heylighen y Joslyn 2001), también se identifica con la forma o estructura que aparece en los procesos alejados del equilibrio de los sistemas disipativos o: cuando una fluctuación se amplifica y se estabiliza forma una configuración macroscópica dinámica a través del flujo de energía que atraviesa el sistema. Las células de convección de Bénard, los huracanes, los torbellinos en el desagüe del lavabo, o la reacción química de Belousov-Zhabotinsky son ejemplos paradigmáticos de sistemas disipativos autoorganizados en los que emerge una forma o

patrón a nivel global que no se encuentra en el nivel de los componentes simples. Aunque el estudio de estos sistemas complejos ha constituido un avance importante en biología teórica, en estos casos no se genera un sistema dotado de finalidad propia o capaz de distinguir entre el interior y el exterior del sistema (Moreno 2004; Keller 2008). El uso del término AO en estos casos de *AO como emergencia de patrones* es muy diferente del kantiano, ligado a la definición de organismo, y genera discusiones filosóficas en torno a la emergencia, como veremos.

## 3.1 Conceptos de termodinámica y orden/organización ↑

La tradición kantiana se desarrolla en contacto con la termodinámica, su historia ocurre en las relaciones complejas y cambiantes de lucha por la supremacía entre las ciencias de la vida, la física y la ingeniería. Keller (2008) sugiere que hay ambivalencias a la hora de entender los organismos y los sistemas físico-químicos en la segunda mitad del siglo XIX. Los problemas con respecto a la primera ley (conservación de la energía) se solucionan pronto: la energía no se conserva en los organismos, pero sí en el sistema cerrado que los contiene. El cumplimiento de esta ley parece requerir que los organismos no sean sistemas cerrados sino abiertos, pero esa situación suscita problemas respecto a la identidad del sistema si la constitución de la identidad auto-organizada se asocia con el cierre (como es el caso de la autopoieis, que se verá más adelante). Keller (2008) considera que esta ambigüedad entre cierre versus relacionalidad se manifiesta sobre todo en relación con la segunda ley (sobre el aumento de entropía), y recuerda que fue preciso que desde la química y la bioquímica se distinguiera entre equilibrio y estado estacionario en la década de 1920-1930, dado que el concepto de equilibrio era inadecuado para los seres vivos, cuyas capacidades adaptativas deben descansar en una noción de estabilidad modificable alejada del equilibrio (el equilibrio termodinámico equivale a la muerte de los seres vivos). La noción de control explica cómo se mantiene la diferencia entre el sistema y el entorno, y hay que distinguir entre los estados estacionarios que resultan de una difusión pasiva y los que dependen del transporte activo por parte del sistema, que requieren control y regulación. Ludwig von Bertalanffy también defendió que los seres vivos son sistemas abiertos, alejados del equilibrio frente a la comprensión de la organización en términos de cierre.

## 3.2 Auto-organización, autoensamblaje y “materia activa” ↑

Orden y organización son claves para explicar la vida; en el mundo físico se observa la aparición espontánea de formas individuales macroscópicas ordenadas de manera espontánea, con o sin consumo de energía. En los sistemas físico-químicos “disipativos”, en condiciones alejadas del equilibrio y mientras haya aporte de energía, millones de moléculas se autoorganizan y adoptan configuraciones macroscópicas estables y ordenadas (por ejemplo en un tornado o en las células de Bénard); estas estructuras se desintegran en cuanto desaparecen las condiciones de contorno que permiten su existencia. Por otro lado, también en el mundo inanimado se observa la formación espontánea de estructuras “conservativas” que se ordenan o auto-ensamblan a medida que el sistema se aproxima al equilibrio y reduce su energía libre. Ejemplos de ello son los cristales y ciertas macromoléculas, así como las vesículas y las membranas de los seres vivos.

Tanto en la naturaleza como en los seres vivos se dan ambos tipos de procesos de orden de manera espontánea, pero en el mundo no viviente no hay organización, aunque haya orden, mientras que los seres vivos organizan su orden. Por tanto, otra distinción conceptual relacionada es la que se establece entre la autoorganización y el auto-ensamblaje. En la primera, la correlación entre partes materiales de un sistema genera un patrón dinámico y disipativo alejado del equilibrio mientras haya aporte de energía (las reacciones de Belousov-Zabotinsky, los torbellinos y huracanes, y los patrones de convección como las células de Benard son los ejemplos paradigmáticos de AO; otros como las señales químicas, la morfogénesis, la dinámica ecosistémica o los insectos sociales en etología). En la segunda se produce una configuración más estable y estructural en equilibrio o cuasi equilibrio, en la que interacciones débiles forman estructuras como membranas lipídicas, micelas y otros polímeros sin que se requiera flujo de energía (Ruiz-Mirazo 2013). Por ello, la transformación de componentes del sistema, como las reacciones metabólicas, no se consideran procesos autoorganizativos. Ambos procesos –auto-organización y auto-ensamblaje—son necesarios para dar origen a un sistema vivo mínimo, pero ninguno de ellos por sí solo es suficiente

para constituir un ser vivo. Los programas de investigación sobre AO en sus aspectos materiales y físicos vuelven al concepto de “materia activa”, para reunir ambas propiedades (Keller 2016). Frente al paradigma newtoniano de materia pasiva o inerte, la AO conecta con una actitud atenta a las propiedades intrínsecas de los sistemas materiales.

## 4 Auto-organización y desarrollo ontogenético ↑

Las raíces del programa de investigación autoorganizacional en biología del desarrollo se asientan en la modelización matemática de los procesos de morfogénesis y diferenciación embrionaria como ‘sistemas de reacción-difusión’, con sucesiones de desestabilizaciones y estabilizaciones (Rashevsky 1960; Turing 1952; Fox Keller 2002). Son modelos formales, abstractos, que describen los procesos de morfogénesis como crecimiento y ruptura de simetría en el desarrollo ontogenético. Su influencia abarca los trabajos de Waddigton, Thom, y Weiss en las décadas de 1960 y 1970, además de líneas de investigación actuales sobre la modelización del desarrollo.

Los debates sobre la relevancia del cambio en relación a las estructuras y su estabilidad subyacen al pensamiento evolutivo; las posiciones críticas de la biología evolutiva darwinista o de la Síntesis Moderna reivindican el estudio de la forma orgánica, abandonada por la tendencia dominante. Para el gradualismo darwiniano la ontología básica de la vida son procesos y la verdadera realidad es un cambio continuo mientras que la estabilidad sería meramente aparente; por el contrario para el estructuralismo, las estructuras o patrones estables tienen prioridad, y el cambio es discontinuo. Así, en una correspondencia entre los embriólogos R. Thom y C. Waddington ambos discuten sobre cómo debe concebirse la estabilidad dinámica del proceso del desarrollo (Waddington y Thom 1968). Thom da prioridad a la forma, que concibe como una realidad independiente de la sustancia, y se entiende matemáticamente; considera su trabajo como una continuación del de D’Arcy Thompson e inspirado por elementos conceptuales de la teoría del desarrollo de Waddington, tales como los creodos, la homeorresis o el paisaje epigenético. El punto de vista diacrónico de Waddington procura entender cómo cambia algo estable, pues para poder explicar la evolución de las rutas de desarrollo se requiere explicar cómo procesos que son estables (mediante constricciones que gobiernan la canalización de una estructura) pueden al mismo tiempo cambiar y evolucionar. En este diálogo entre Waddington y Thom aparecen dificultades sobre cómo deben integrarse ambas exigencias, la estabilidad y el cambio: cómo puede entenderse la estabilidad estructural con capacidades evolutivas o, en otras palabras, las posibilidades de cambio de una estructura estable.

Weiss y Waddington continuaron con la perspectiva de la AO en embriología y la biología del desarrollo, pero con un enfoque organísmico, no dirigido solamente a estudiar la emergencia de formas o patrones. Para ello Weiss (1968) se centra en el estudio de la dinámica distribuida de procesos mutuamente dependientes, concebida como una red cerrada en la que cada elemento está correlacionado con los otros y en la que pequeñas desviaciones en un estado disparan reacciones de compensación en la red completa. Esta interdependencia aspira a modelar cómo se constituye la identidad del organismo, como una unidad viviente en la que cada componente contribuye a la actividad de los otros y a su mantenimiento. Ambos autores comparten la intuición de que la capacidad de AO de un sistema no reside en los componentes individuales, sino en la red. También Piaget desarrolla ideas similares, pues su obra fue influida por las ideas de Weiss sobre las redes moleculares autoorganizativas y las de Waddington sobre canalización y adaptación. A su vez el trabajo de Piaget (1967) fue una influencia importante para la teoría de la autopoiesis: este autor conectó la noción de apertura termodinámica, como flujo de materia y energía entre sistema y entorno, con la organización circular de procesos, que permite la continua reconstitución de los componentes de un sistema vivo (cierre organizacional). Así, Piaget tomó prestados de conceptos Waddington para caracterizar la interacción entre organismo y medio como una adaptación individual, mediante la *asimilación* de influencias externas en forma de una auto-regulación (o *acomodación*) interna; de esta manera, los cambios en la estructura de la red de interacciones y en los procesos no alteran el esquema organizacional circular.

Pere Alberch, uno de los biólogos que iniciaron la evo-devo, reivindicaba la necesidad de una teoría de la forma que se basara en las propiedades autoorganizativas de la red de interacciones que genera el desarrollo ontogenético, independientemente de su valor adaptativo. Gerd Müller y Stuart Newman (2002) también parten de la tesis de que la generación de formas en los metazoos depende de propiedades físicas autoorganizativas o genéricas, de los

agregados celulares, y no de instrucciones contenidas en los genes, mientras que la evolución genética posterior sirve para consolidar e integrar los mecanismos generados. En cuanto a la función biológica de una parte, ésta no puede limitarse a operar según la ventaja selectiva que proporcionó, en este contexto la función se entiende como una contribución a la integración de las formas generadas en un organismo cohesionado adaptado a su entorno, mediante interacciones que permiten acomodar las formas de las diferentes partes entre sí (Alberch 1982b). Esta concepción de acomodación según la cual las partes orgánicas interactúan entre ellas en el desarrollo y se adaptan las unas a las otras fue también subrayada por West-Eberhard (2003).

Estos trabajos se enmarcan en la evo-devo o biología evolutiva del desarrollo cuyo principal objetivo es la integración de las contribuciones del desarrollo en la evolución y que ha prestado una atención especial a las propiedades autoorganizativas del desarrollo, tanto para explicar la emergencia de estructuras (tejidos y órganos) en el desarrollo, como para defender un enfoque organísmico en la biología evolutiva, en contraste con la perspectiva más reduccionista de la Síntesis Moderna (Garcia Azkonobieta 2005).

## 5 Autopoiesis y organización de los seres vivos ↑

La definición de autopoiesis propuesta en la década de1970 por los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela fue cambiando a lo largo de los años. Una de las primeras se refiere a “máquinas” (más tarde escribirán “sistemas”) y manifiesta que: “Una máquina autopoiética es una máquina organizada como un sistema de procesos de producción de componentes concatenados de tal manera que producen componentes que: i) generan los procesos (relaciones) de producción que los producen a través de sus continuas interacciones y transformaciones, y ii) constituyen a la máquina como una unidad en el espacio físico” (Maturana y Varela 1973/2004, 69). El enfoque autopoiético entiende la vida de manera muy distinta a la teoría de la evolución o de la biología molecular. El elemento principal de la teoría es la organización dinámica de los materiales que constituye un ser vivo individual y no la capacidad de reproducción o de evolución. Desde esta perspectiva todos los componentes del sistema tienen el mismo estatus para explicar la dinámica autorreferencial por la que producen una unidad, y critican la genética de su tiempo para la que algunos componentes, los ácidos nucleícos, son portadoras de información como instrucciones.

Los sistemas autopoiéticos proporcionan un esquema general relacional para caracterizar los seres vivos como un esquema o configuración de procesos de transformación de componentes cuyo resultado es la configuración misma, en la que, por tanto, coinciden identidad y actividad, proceso productor y entidad producida. A diferencia de las máquinas de Turing, construidas y formateadas por personas programadoras externas (por tanto, heteropoiéticas) para que computen problemas que se refieren a asuntos diferentes del sistema mismo (siendo, por tanto, allopoiéticas), las máquinas autopoiéticas operan para realizarse a sí mismas. Ya en 1974 los autores presentaron su teoría de la organización viviente acompañada de un modelo computacional de autómatas celulares (Varela, et al. 1974; este modelo fue más tarde reprogramado por Barry McMullin 2004).

Algunas de las distinciones que caracterizan la teoría, por ejemplo entre autopoiético y heteropoiético, ya aparecen en *La connaisance de la vie* de Canguilhem (1965). El enfoque autopoiético pertenece a esa tradición sistémica para la que el elemento central de la biología y la fisiología es la unidad relacional del viviente, perspectiva asociada a la kantiana, al concepto de *milieu intérieur* de Claude Bernard y a esa tradición organicista que defiende la primacía de la organización para caracterizar la vida, constituida por G. Canguilhem, H. Jonas, P. Weiss, C. Waddington, J. Piaget entre otros. A su vez se opone a la visión dominante en la biología de la época, por ejemplo algunas ideas defendidas por F. Jacob en *La logique du vivant* (Jacob 1970) y que se refieren a la primacía de la visión evolutiva de la vida sobre la fisiológica del ser vivo en biología o a la importancia del programa genético para entender la “lógica” de lo viviente (Bich y Etxeberria 2013). También está claramente relacionada con la cibernética, de la que parte explícitamente aunque esté influida, en especial, por la cibernética de segundo orden (Pickering 2010).

## 5.1 Aspectos básicos de la noción de autopoiesis ↑

El sistema autopoiético se caracteriza por su *cierre operacional u organizacional*[3], noción que proporciona una reinterpretación de la noción cibernética de *autoestabilización circular*. Ésta toma como referente al sistema viviente completo en lugar de comenzar por procesos regulatorios simples aislados y después acoplarlos unos con otros. El sistema autopoiético se organiza de tal forma que no solo mantiene la estabilidad de ciertas variables, sino también la organización global.

Algunos de los conceptos principales de la teoría apuntan a distinciones entre:

*Organizacion y estructura*. - Según la teoría autopoiética un organismo no se caracteriza por sus procesos materiales o físico-químicos, sino por el entramado de interacciones que produce y mantiene al sistema biológico integrado. Por eso distinguen entre la estructura, que se refiere a la realización física de un ser vivo, que es variable, de la organización, concepto que trata de capturar la parte invariante del mismo, la topología de relaciones que lo constituye. Se adopta una forma particular de *realizabilidad múltiple* entre organización (como tipo) y estructura (como ejemplar o *token*), pues la organización autopoiética se propone como la invariante que permanece tras la fenomenología biológica diversa debida a los cambios ontogenéticos y filogenéticos.

*Apertura y cierre*. - Los seres vivos son sistemas abiertos al intercambio de materia y energía al nivel de la estructura, pero la red de procesos que constituye su organización está cerrada en forma de un proceso global cíclico que se determina y se regenera a sí mismo. Esta distinción entre estructura abierta y organización cerrada fue introducida, como se vio antes, por Jean Piaget (1967). Rosen desarrolló un enfoque similar de forma independiente y lo expresó matemáticamente mediante las nociones de *abierto a la causación material* y *cerrado a la causación eficiente* (Rosen 1972; 1991; Letelier et al. 2006).

Otras características de la teoría son su internalismo, que se hace presente a través de la noción de determinismo estructural; en cada paso del tiempo, el sistema interactúa con su entorno y su estructura especifica o determina el conjunto de los cambios posibles ante las perturbaciones efectivas. Estas no definen los cambios estructurales, el entorno no especifica los cambios, solo los impulsa: los efectos dependen de la estructura receptora y a diferencia de las relaciones de estímulo respuesta (input-output), los mismos estímulos pueden producir alteraciones distintas. F. Varela mostró esta peculiaridad mediante un modelo de autómatas celulares al que llamó *Bitorio* (Varela et al. 1991) para ilustrar que entre dos sistemas no hay transmisión de información, solo *acoplamiento estructural*.

En este marco fisiológico la noción de evolución se reinterpretó en términos neutralistas como *deriva natural*. La adaptación no se entiende como optimización de los rasgos de un organismo mediante selección natural, sino como el mantenimiento del acoplamiento entre el ser vivo y su entorno (Maturana y Varela 1984; Maturana y Mpodozis 2000; Etxeberria 2004).

## 5.2 Desarrollo de la tradición autopoiética ↑

La teoría autopoiética ha influido en los debates sobre la definición de vida, sobre el concepto de autonomía y de agencialidad en biología y ciencias cognitivas y en otros campos relacionados como la Vida Artificial, la Biología Sintética, la Astrobiología y, en general, la Biología de Sistemas. Por otra parte se ha intentado extender la noción de autopoiesis desde el nivel celular al multicelular y a los sistemas sociales, pero esta ampliación ha resultado sumamente controvertida.

En sus inicios, la autopoiesis y la vida artificial estaban alineadas en sus objetivos en lo que respecta a otorgar mayor importancia a la forma, pero diferían en lo concerniente a la naturalización de la vida: la Vida artificial, influida por la biología evolutiva, la entendía en términos de reproducción y evolución, mientras que la autopoiesis la entendía en términos de autonomía y organización. El mayor impacto de la autopoiesis ha sido impulsar la noción de autonomía como un ingrediente de la definición de vida.

Aun así, a menudo se mantiene que es problemático estudiar las operaciones de los seres vivos sólo en un nivel formal abstracto, sin considerar la complejidad de las realizaciones materiales e históricas de la vida tal y como la conocemos. Por ejemplo, la explicación formal de la autonomía no se adecua a los criterios termodinámicos precisos para mantener de manera realista el estado de actividad del sistema considerado en su entorno, y uno de los principales desarrollos de la teoría original ha tenido en cuenta cómo puede entenderse la autonomía biológica en modelos que incorporen constricciones materiales.

En el campo del origen de la vida la teoría autopoiética ha reforzado los argumentos a favor del origen celular o sistémico de la vida (Luisi 2006), frente al planteamiento molecular del “mundo de RNA”.

El enfoque autopoiético conecta con la biología de sistemas por su noción de sistema como unidad integrada, que prioriza la modelización del metabolismo celular como una red cerrada e imbricada de procesos, la consideración ecológica de los genomas y el papel de la autorregulación a diferentes niveles de organización.

La AP se asocia a la capacidad del sistema para dotar de significado al mundo, la cognición se considera como una propiedad relacionada, incluso coincidente, con la vida. El enfoque enactivo que surge a partir de la AP favorece el enfoque corporeizado y situado para caracterizar agentes cognitivos (Varela et al. 1991; Di Paolo et al. 2017). También las y los observadores humanos son sistemas determinados estructuralmente. La AP subraya los límites de las nociones de representación y objetividad, y contribuye al desarrollo de una perspectiva epistemológica a la que se ha llamado “constructivismo radical”, según la cual el mundo natural emerge como coherencias en el acoplamiento entre persona observadora y entorno.

Dado que la AP se propuso originalmente en nivel celular, una pregunta recurrente ha sido si es posible extender la teoría para caracterizar seres vivos multicelulares o sistemas sociales, a veces considerados como sistemas autopoiéticos de segundo o tercer orden, respectivamente, cuya organización se derivaría de las propiedades celulares, pero la formulación original no ofrece criterios que permitan realizar esta expansión de manera satisfactoria.

A pesar de estas dificultades, la noción de autopoiesis ofrece una perspectiva articulada para la biología, enraizada en la tradición fisiológica en biología y medicina, y crítica con la tradición evolutiva (Pradeu 2016). La AP ha proporcionado un escenario relevante para investigar sobre la vida, el organismo individual y su autonomía desde la perspectiva autoorganizativa kantiana, y desde una posición cercana a la fenomenología.

## 6 Relación entre auto-organización y autopoiesis ↑

Desde la autopoiesis se pregunta frecuentemente si la AO es o no es suficiente para definir vida. Mientras que el concepto de AO kantiano, así como el que más tarde se asocia a la regulación sistémica, aspira a poder definir un sistema vivo, el asociado con la generación de patrones suele considerarse insuficiente. Este argumento está basado en la distinción entre AO y autonomía que se ha desarrollado en las últimas décadas, aunque no en Kant. Ésta se refiere a que la autonomía consiste en algo más que la aparición de estructuras de forma espontánea en ciertos sistemas, pues conlleva también la existencia de una identidad agencial constituida en la operación del sistema que se asocia con la vida.

Un ejemplo de la insuficiencia de la AO asociada a la generación de patrones para definir la vida sería el siguiente. En un huracán la acción de los componentes se autoorganiza para constituir la estructura o forma observada, pero ésta desaparece cuando los procesos dinámicos dejan de operar. Por tanto, aunque los sistemas autónomos sean ejemplos de sistemas auto-organizativos, a la inversa no puede mantenerse: no todos los sistemas que suelen considerarse auto-organizativos son autónomos. La autonomía está asociada a procesos de concatenación y regulación de fenómenos de orden y AO autoorganizativos de manera que se controlan o constriñen en el seno de una organización operacionalmente cerrada y por tanto relativamente estable.

La AP aspira a ofrecer una noción suficiente para definir vida; como se desarrolló en un periodo en el que los trabajos en estructuras disipativas tenían mucho éxito y se consideraban claves importantes para entender la vida, siempre

trató de distinguirse del enfoque termodinámico por esta ambición de dar cuenta de la especificidad de lo vivo.

Por otro lado, puede entenderse que la AP, con su distinción entre organización y estructura, defiende una versión de la realizabilidad múltiple de Putnam, según la cual hay una relación de una a muchas entre las propiedades organizacionales o funcionales y su realización material; es decir, una misma organización o función puede encontrarse en diferentes estructuras materiales (Varela y Maturana 1972). Según la AP la dimensión invariante de la vida es la organización, mientras que la termodinámica concierne a la estructura material, relacionada con la variedad. Aunque un ser vivo deba satisfacer ciertos requisitos materiales para su realización, por ejemplo, mantenerse alejado del equilibrio termodinámico, Varela y Maturana mantienen que es la organización del sistema (que posibilita su autoproducción, incluida la membrana o frontera que le confiere una independencia parcial de las condiciones externas) la que hace que un sistema termodinámico abierto sea un organismo; sin aquella, sería solo una estructura disipativa. Las estructuras autoorganizadas disipativas dependen de las condiciones externas, pues emergen espontáneamente cada vez que se dan las condiciones específicas y desaparecen cuando aquellas cambian. La escuela autopoiética dedicó más tiempo a señalar los puntos débiles de la tradición termodinámica de la AO, es decir, su insuficiencia, que a reconocer las deudas teóricas contraídas con el mismo. Aunque esta tradición ha postulado que la realidad biológica está poblada por unidades relacionales cuya propiedad primera es la autonomía, no ha definido el mecanismo capaz de generar estas unidades y su fenomenología. Maturana y Varela (1973) mantienen que para poder hacerlo habría que tener en cuenta algo esencial, a saber: que la organización que sostiene la autonomía biológica constituye la invariante de la fenomenología biológica, tanto a nivel ontogenético como filogenético. Varela (1984) recupera dos significados de AO y los integra en la teoría de la autopoiesis para explicar comportamientos generados por mecanismos altamente distribuidos. Cuando se genera una red cerrada, ésta produce sus propias regularidades que se entienden como comportamientos de AO. Además el sistema es adaptativo en tanto su organización se mantenga invariante a pesar de los cambios en su estructura. La tradición auto-organizativa se reconceptualiza como autonomía, entendida como el control activo realizado por el organismo sobre sus propios procesos: la capacidad de reaccionar a lo externo compensando a través de variaciones auto-determinadas las desestabilizaciones causadas por las perturbaciones.

La AP se separa de la primera cibernética y de su forma de entender AO como capacidad de responder activamente a las perturbaciones. En los sistemas autopoiéticos no se postulan subsistemas centralizados de control, como el núcleo celular o el cerebro, ni mecanismos especializados jerárquicos, como aquellos descritos por Ashby u otros cibernéticos como Beer (1972) o Miller (1978), sino respuestas distribuidas, ni centralizada ni jerárquicas (Hejl 1990).

Otra diferencia entre ambas es que la AP niega explícitamente la teleología así como la posibilidad de atribuir funciones a los componentes de un ser vivo. Los componentes en sus interacciones interactúan operacionalmente sin referencia alguna a estados globales futuros o pasados del sistema que los alberga. En contraste, esta oposición radical a funciones y teleología contrasta recientemente con enfoques organizacionales que las aceptan (Christensen y Bickhard 2002, Mossio et al. 2009, Christensen 2012, Mossio y Bich 2014).

En la Biología Teórica se han propuesto otros conceptos autoorganizativos de vida (Etxeberria y Umerez 2006). Como hemos visto, desde mediados del siglo XX, el estudio de los sistemas autónomos empezó a ser un tema habitual de investigación de la cibernética y de la ciencia de sistemas, continuado a finales del siglo XX por la “Vida Artificial” y los “Sistemas Complejos” (Etxeberria y Umerez 2006). En el trabajo de Maturana y Varela las relaciones dinámicas entre los componentes constituyen una identidad que se separa a sí misma del entorno mediante la construcción de una membrana. Recientemente se ha vuelto a hacer disponible en inglés la obra del biólogo húngaro Tibor Ganti (2003) que, en la misma época que la teoría de la autopoiesis, desarrolló otro trabajo teórico sobre otro sistema mínimo: el chemoton. También Robert Rosen desarrolló un sistema denominado “sistemas MR”, redes de reacción con la capacidad de evolucionar (Rosen 1958; 1959; 1971). Rosen desarrolla una biología teórica a partir de la diferencia entre organismo y mecanismo, una teoría de la modelización, un rechazo de la asimilación del paradigma mecanicista determinista newtoniano al entorno de los seres vivos, una reflexión sobre las causas aristotélicas y la necesidad de ampliar el paradigma newtoniano basado en causas eficientes para poder explicar lo que son los organismos (a diferencia de los mecanismos).

El concepto de AO ha sido crucial en el desarrollo de la biología teórica en el siglo XX, un campo que defiende la necesidad de esclarecer los fundamentos teóricos de esta ciencia (Etxeberria y Umerez 2006). Desde su origen se

destaca por preocuparse especialmente del problema de la organización biológica y por la elaboración de herramientas metodológicas (primero matemáticas, después computacionales) para su tratamiento científico. Este campo está relacionado con el organicismo, posición que trata de superar la confrontación entre el vitalismo y el mecanicismo, en pugna todavía en esa época. Enfrentado tanto a uno como a otro, el organicismo concuerda con el primero en un cierto holismo que le lleva a propugnar la importancia de tener en cuenta el conjunto del sistema, el todo, y la necesidad de diferentes niveles en la explicación de la organización viviente, pero manteniendo con el segundo la creencia de que los procesos vivientes deben ser objeto de explicaciones materiales.

## 7 Auto-organización y emergencia ↑

A lo largo de este trabajo nos hemos referido a dos maneras diferentes de entender la relevancia de la AO para caracterizar la aparición de orden espontáneo en sistemas naturales y artificiales. Una de ellas se refiere a la AO como emergencia de patrones que hemos revisado en el apartado 3, mientras que la otra se remonta a la perspectiva kantiana que entiende los organismos como fines naturales, con la idea de sistemas autoproducidos en la teoría de la AP, o también a la más reciente concepción de la autonomía (Moreno et al. 2008; Moreno y Mossio 2015). Las dos perspectivas constituyen dos formas diferentes de entender la relación de la AO con la emergencia.

Las dos concepciones coinciden en que las inestabilidades dan lugar a fenómenos auto-organizativos irreductibles al funcionamiento simple de los componentes elementales, pero se diferencian en el modo de entender tales propiedades (ver un análisis más detallado en Bich 2012b). Mientras que la primera sostiene que pueden explicarse la historia y la evolución de la naturaleza como un proceso continuo de complejización a partir de los fenómenos auto-organizativos, tanto su origen como las propiedades de todos los sistemas complejos, incluidos los cognitivos, la segunda concibe la emergencia como una revelación de propiedades organizacionales, más allá de la aparición de formas y estructuras.

En el primer caso, la AO es responsable de la generación de los fenómenos colectivos y los patrones ordenados, estables en el tiempo y con respecto a las perturbaciones externas, que exhiben algunos sistemas fisicoquímicos explicados por la termodinámica de las estructuras disipativas, como las células de Bénard y los relojes químicos (Nicolis y Prigogine 1977; Prigogine y Stengers 1979). Además pueden obtenerse resultados similares en el dominio computacional a través de simulaciones apropiadas. Estos procesos se asocian con la emergencia, en tanto que exhiben algunas propiedades novedosas, porque las propiedades estables, regulares u ordenadas pueden identificarse al nivel superior de los fenómenos, en sus formas o estructuras, pero no desde el nivel de sus componentes.

Esta asociación entre AO y emergencia ha sido criticada en física (Anderson y Stein 1985) y en el campo de los sistemas complejos la AO se consideró como una forma débil de emergencia (Crutchfield 1994; Minati y Pessa 2006; Bedau 2008). Crutchfield distingue dos formas diferentes de emergencia para caracterizar la forma específica de novedad mostrada por los diferentes fenómenos emergentes (Crutchfield 1994): 1) la emergencia como la impredecibilidad de un fenómeno con respecto a sus condiciones iniciales o al comportamiento de algunos elementos del nivel básico; y 2) la emergencia como la no deducibilidad de un fenómeno con respecto al modelo que describe la dinámica inicial del sistema o el comportamiento de sus constituyentes del nivel básico.

Los fenómenos auto-organizativos como los estudiados por la termodinámica de las estructuras disipativas (emergencia termodinámica) o las simulaciones computacionales producidas en el dominio de la vida artificial (emergencia computacional) pertenecen al primer tipo de emergencia. Aunque la generación del patrón ordenado es, en principio, deducible del modelo que describe la dinámica de los constituyentes del sistema y el proceso puede, por tanto, ser simulado en software, la trayectoria específica del sistema en su espacio de fases no es predecible en un cierto horizonte temporal, debido a interacciones no lineales entre los componentes. En consecuencia, la generación del patrón ordenado no es predecible debido a las características dinámicas que lo realizan: en este caso cuando se cruza un cierto umbral en una variable del sistema se puede observar la instanciación de un fenómeno que es cualitativamente diferente con respecto a la situación inicial. Un ejemplo de esta transición sería la ley de conversión de la cantidad en cualidad propuesta por Friedrich Engels en 1883 (Engels 1952). El patrón de nivel superior no puede

predecirse pero sí deducirse a partir de los modelos disponibles. Por eso, la expresión AO que se adscribe habitualmente a esta clase de fenómenos se refiere a la organización estructural que resulta del proceso de generación de un orden espacial, de naturaleza epifenoménica. La AO así entendida no implica la emergencia de un nivel nuevo que requiera una nueva descripción; son fenómenos que muestran una forma débil de emergencia, similar a la propuesta por Mark Bedau (2003) y caracterizada por la existencia 'en principio' de un límite epistémico para describir un sistema. La relación micro-macro se caracteriza como una covariación entre, por lo menos, dos escalas observacionales y la dinámica del sistema exhibe comportamientos como la canalización antes mencionada, que puede caracterizarse como una correspondencia de muchos-a-uno entre diferentes escalas (Abel y Trevors 2006). El nivel superior, aunque epifenoménico, puede considerarse como la resultante de una multiplicidad de interacciones posibles en el nivel inferior.

Este tipo de fenómenos no constituyen un modelo apropiado de lo que caracteriza a los seres vivos como unidades autónomas e integradas. La complejidad de la configuración resultante depende solo de la interacción complicada entre las partes del sistema, sin que se genere una brecha observacional operativa alguna. El modelo de fenómeno emergente que sí permite dar cuenta de la producción de una novedad que tenga un papel efectivo en el sistema mismo que lo produce se refiere al segundo tipo de emergencia, que desde el punto de vista descriptivo instanciaría una relación de no-deducibilidad. En esta clase de fenómenos la realización del nuevo sistema no puede deducirse ni siquiera en principio del modelo que describe la dinámica inicial. Esta clase de fenómenos incluyen la ruptura de simetría espontánea descrita por las teorías cuánticas en física (Anderson y Stein 1985; Humphreys 1997; Bitbol 2007), así como los procesos autopoiéticos y evolutivos en el dominio biológico, que permiten expresar una forma fuerte de autonomía.

## 8 Auto-organización y evolución ↑

En los últimos años se ha planteado el papel y la relevancia del concepto de AO en la biología evolutiva, y si constituye una perspectiva alternativa o complementaria a la selección natural. Una perspectiva importante dentro de la biología evolutiva, la biología evolutiva del desarrollo o evo-devo, mantiene, a diferencia de la biología evolutiva estándar, que los procesos generativos de la forma o la morfología cumplen un papel causal en la evolución. Para este campo de investigación la explicación causal o mecanicista de cómo se generan las morfologías en los procesos ontogenéticos es un ingrediente que debe completar la teoría de la evolución heredada de la síntesis moderna. En este campo se ha prestado mucha atención a la AO como un proceso relevante en la ontogenia y la filogenia de la vida. La introducción de la noción de AO en el seno de la teoría de la evolución darwiniana trae consigo un cierto acercamiento entre desarrollo y evolución. La evolución se puede concebir, y de hecho se ha concebido, como un proceso análogo al del desarrollo, como un cambio que procede en forma de estadios sucesivos.

La teoría biológica reciente está integrando paulatinamente desarrollos provenientes del análisis de los sistemas complejos y auto-organizativos para caracterizar sistémicamente a los seres vivos. Los sistemas naturales alejados del equilibrio comparten muchas características con los seres vivos: son sensibles a las condiciones iniciales, cambios no-lineales en las trayectorias de espacios de fase, propiedades auto-organizativas y habilidad para adaptarse a paisajes rugosos. Los modelos auto-organizativos pueden iluminar fenómenos como el origen de la vida, la dinámica del desarrollo, la estructura de los sistemas ecológicos o la dirección y patrón del cambio filogenético, aunque choquen a veces con las posiciones "ortodoxas" del darwinismo.

Si la evolución de cada rasgo no es independiente de la de los otros, se deben tener en cuenta las constricciones impuestas por las interacciones, así como las que proceden de los procesos de desarrollo, que hacen que las nuevas estructuras y funciones dependan de las previamente establecidas. La consideración de tales constricciones limita el alcance de la selección natural como fuerza evolutiva, admitiendo deriva y contingencia por el carácter histórico de la evolución, por un lado, y proponiendo principios dinámicos basados en las propiedades auto-organizativas de los seres vivos, por otro.

Se ha sugerido que desarrollos provenientes del análisis de los sistemas complejos y auto-organizativos (Kauffman

1992; 1993) podrían permitir una reinterpretación del concepto de selección natural (Depew y Weber 1995). La hipótesis sostiene que el concepto de selección natural ha sufrido varias re-interpretaciones ontológicas en su historia centradas en diferentes modelos dinámicos en los que se ha basado.

A finales de los noventa asistimos a varios debates sobre los papeles respectivos de la selección natural y la AO en la teoría de la evolución. Depew y Weber (1995, ver también 1997) distinguen siete posturas para relacionar conceptualmente la selección natural y la AO, posturas que constituyen un espectro de actitudes científicas que muestra un recorrido desde quienes, según los autores, se encuentran cómodamente instalados-as en la tradición darwinista hasta quienes proponen un cambio paradigmático total. Sintéticamente, estas posturas son (1) la selección natural, y no la AO, conduce la evolución; (2) la AO constriñe la selección natural; (3) la AO es la hipótesis cero sobre la que debe medirse el cambio evolutivo; (4) la AO es auxiliar a la selección natural para causar el cambio evolutivo; (5) la AO conduce la evolución pero es constreñida por la selección natural; (6) la selección natural es, en sí misma, una forma de AO, y (7) la selección natural y la AO son dos aspectos de un mismo proceso evolutivo.

¿Qué aspectos de la teoría de la evolución se están poniendo en cuestión en estos trabajos? En primer lugar, el protagonismo de la selección natural se matiza porque hay más constricciones que las meramente ambientales. En segundo lugar, se distinguen niveles distintos de evolución, el nivel molecular, el nivel de organismos y el nivel de especies. En el nivel molecular se acepta la noción de azar (teoría neutralista); a nivel de los organismos actúa la selección natural, y a nivel de especies y los taxones superiores, o bien se postula la acción de una selección específica de ese nivel o, si no, que la evolución sea posible sin selección propiamente dicha. En tercer lugar, la pregunta ¿qué es evolución? está cuestionándose, pues definitivamente se propone una visión que se acerca más al desarrollo y a las características asociadas a éste, que el proceso de sustitución de variantes en la sucesión de las generaciones por selección natural. Depew y Weber plantean (1995) que la investigación de los sistemas complejos basada en capacidades auto-organizativas no atenta contra la noción misma de selección natural como mecanismo principal de la evolución, sino que, al contrario, se crea un marco en el que es posible comprender mejor la actuación de la selección natural y su significación física mediante el desarrollo de nuevos modelos dinámicos.

## 9 Conclusiones ↑

En esta voz hemos examinado diferentes nociones de auto-organización. La AO kantiana es sistémica y aspira a explicar las capacidades de los seres vivos. Pero Kant no creyó que pueda haber una explicación naturalista de la naturaleza de los seres vivos a la manera de la física newtoniana, y los intentos de superar esta limitación kantiana marcaron los estudios sobre AO. El desarrollo posterior trata de abrir líneas de investigación que permitan que la ciencia acceda al estudio de las propiedades autoorganizativas pero se debate si los enfoques operacionales de la AO de talante termodinámico o formal concuerdan con las intuiciones originales. La teoría de la autopoiesis se inserta en este debate estando, por un lado, entre las concepciones críticas con la AO termodinámica como emergencia espontánea de patrones materiales y, a su vez, recibe críticas de aquellas posiciones que consideran que la propia teoría AP es excesivamente formalista y no incorpora elementos materiales contingentes e históricos en su noción de organización viviente. La tensión existente entre estas dos limitaciones parece equilibrarse en algunas tradiciones afines a la biología del desarrollo, como la biología evolutiva del desarrollo, para la que las propiedades de los seres vivos dependen de una evolución que es al mismo tiempo causa y producto de la auto-organización biológica.

## 10 Notas ↑

1.- “En los animales de sangre caliente es únicamente donde parece existir la independencia entre las condiciones del organismo y las del medio ambiente; en estos animales, en efecto, la manifestación de los fenómenos vitales no sufre las alternativas y las variaciones que sufren las variaciones cósmicas, y parece que una fuerza interior viene a luchar contra estas influencias y a mantener, a pesar de ellas, el equilibrio de las fuerzas vitales. Pero en el fondo no es así, y […] el medio interior del animal de sangre caliente se pone con más dificultad en equilibrio con el medio cósmico

exterior" (Bernard IEME, pag. 232-3) Volver al texto

2.- La insuficiencia de los modelos cibernéticos para caracterizar la dimensión teleológica de los seres vivos como diferentes de los artefactos fue puesta en evidencia por Hans Jonas (1953). La cibernética, según Jonas, no es capaz de dar cuenta de si el intervalo estabilizado por los mecanismos de retroalimentación es establecido por un-a diseñadora externa o por el sistema mismo, ni tampoco puede dar cuenta de la relación entre homeostasis y metabolismo, dado que los componentes de un mecanismo cibernético en los sistemas biológicos no son solamente estabilizados sino que son producidos por el sistema mismo (Jonas 1966). Volver al texto

3.- A pesar de que a veces en la literatura estas dos expresiones sean utilizadas como sinónimos, se debate si conviene distinguir entre ellas (Bich y Arnellos 2012). *Cierre operacional* se referiría primariamente al sistema nervioso como red, y al hecho de que los efectos de sus operaciones afectan al sistema nervioso mismo. *Cierre organizacional* expresaría, a su vez, la capacidad más fundamental de autoproducción del sistema: es decir, se refiere más específicamente a las operaciones como contribuciones a la generación y mantenimiento de las condiciones de existencia del sistema, y no solamente a la recursividad de sus operaciones. Volver al texto

## 11 Bibliografía ↑

Abel, D. L., y Trevors, J. T. 2006. "Self-organization vs. self-ordering events in life-origin models". *Physics of Life Reviews* 3: 211–228.

Anderson, P. W., y Stein, D. L. 1985. "Broken symmetry, emergent properties, dissipative structures, life: Are they related?". En: *Self-organizing systems: the emergence of order*, editado por E. F. Yates, 445-458. New York: Plenum Press.

Ashby, R. 1956. *An Introduction to Cybernetics*, London: Chapman & Hall.

Ashby, R. 1962. "Principles of the Self-Organizing System". En *Principles of Self-Organization*, editado por H. Von Förster y G. W. Zopf, 255-278. Oxford: Pergamon Press.

Beer, S. 1972. *Brain of the firm*. London: Penguin.

Bedau, M. 2003. "Downward causation and autonomy in weak emergence". *Principia* 6: 5–50.

Bedau, M. 2008. "Is weak emergence just in the mind?". *Minds & Machines* 18: 443–459.

Bernard, C. 1865. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris: Baillière.

Bernard, C. 1878. *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Paris: Bailliére.

Bechtel, W. y Richardson, R. 2010. *Discovering complexity*. Cambridge MA: MIT Press, 2da edición.

Bich, L. 2012a. "Il concetto di"milieu intérieur": ruolo e implicazioni teoriche in un approccio sistemico allo studio del vivente". En *Quaderni del CERCO. Epistemologie in Dialogo? Contesti e costruzioni di conoscenze*, editado por E. Cianci, 179-210. Rimini: Guaraldi.

Bich, L. 2012b. "Complex emergence and the living organization: an epistemological framework for biology". *Synthese* 185(2): 215-232.

Bich, L. y Arnellos, A. 2012. "Autopoiesis, Autonomy, and Organizational Biology: Critical Remarks on 'Life After Ashby'". *Cybernetics & Human Knowing 19*(4): 75-103.

Bich, L. y Etxeberria, A. 2013. "Systems, Autopoietic". En *Encyclopedia of Systems Biology*, editado por W. Dubitzky,

O. Wolkenhauer, K-H. Cho, y H. Yokota, 2110-2113. New York: Springer.

Bitbol, M. 2007. “Ontology, matter and emergence”. *Phenomenology and the Cognitive Science 6*: 293–307.

Boorgerd, FC., Bruggerman, FJ, Hofmeyr, J-HS, Westerhoff, HV. (Eds). 2007. *Systems Biology. Philosophical Foundations*. Amsterdam: Elsevier.

Cahiers du CREA. 1985. *7. Histoires de cybernétique* y *8. Genealogies de L'Auto-Organisation*. Paris: CREA.

Camazine, S., Deneubourg, J-L, Franks, N.R., Sneyd, J., Theraulaz, G. y Bonabeau, E. (Eds). 2003. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton: Princeton University Press.

Canguilhem, G. 1965. *La connaissance de la vie*. Paris: Libraire Philosophique J. Vrin

Cannon, W. B. 1929. “Organization for Physiological Homeostasis”. *Physiology Review* 9 (3): 399-431.

Cannon, W.B. 1939. *The wisdom of the body*. New York: WW Norton.

Cariani, P. 2009. “The homeostat as embodiment of adaptive control”. *International Journal of General Systems* 38(2): 139-154.

Christensen, W. y Bickhard, M. 2002. “The process dynamics of normative function”. *The Monist* 85(1): 3-28.

Christensen, W. 2012. “Natural sources of normativity”. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences* 43(1): 104-112.

Crutchfield, J. P. 1994. “Is anything ever new? Considering emergence”. En *Complexity: Metaphors, models and reality*, editado por G. A. Cowan, D. Pines, y D. Meltzer, 515–533. Redwood City: Westview Press.

Depew, D. y Weber, B. 1995. *Darwinism Evolving. Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection.* Cambridge, MA & London: MIT Press.

Di Paolo, E., Buhrmann, T., y Barandiaran, X. 2017. *Sensorimotor Life: An Enactive Proposal*. Oxford: Oxford University Press.

Engels, F. 1952. *Dialektik der Natur*. Berlin: Dietz Verlag.

Etxeberria A. 2004. “Autopoiesis and Natural Drift: Genetic Information, Reproduction and Evolution Revisited”. *Artificial Life* 10 (3): 347-360.

Etxeberria A. y Umerez, J. 2006. “Organismo y organización en la biología teórica: ¿vuelta al organicismo?”. *Ludus Vitalis* 14 (26): 3-38.

Etxeberria, A. y Nuño de la Rosa, L. 2009. “A World of Opportunity Within Constraint: Pere Alberch’s Early Evo-devo”. En *Pere Alberch. The Creative Trajectory of an Evo-devo Biologist*, editado por D. Rasskin-Gutman y M. De Renzi, 21–44. Valencia: Publicacions Universitat de València.

Feltz B., Crommelinck M., y Goujon P. (Eds). 2006. *Self-organization and emergence in life sciences*. Synthese Library. Dordrecht: Springer.

García Azkonobieta, T. 2005. *Evolución, desarrollo y (auto)organización. Un estudio sobre los principios filosóficos de la evo-devo*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco UPV/EHU. http://www.ehu.es/iasresearch/garcia/TESIS.pdf.

Gould, S.J. y Lewontin, R. 1979. “The spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A critique of the Adaptationist Program”. *Proceedings of the Royal Society of London* CCV: 581-98.

Green, S. (Ed). 2016. *Philosophy of System Biology*. Dordrecht: Springer.

Hejl, P. M. 1990. "Self-regulation in social systems". En *Selforganization: Portrait of a scientific revolution*, editado por W. Krohn, G. Küppers y H. Nowotny, 114-127. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Heylighen, F. y Joslyn, C. 2001. "Cybernetics and Second-Order Cybernetics". En *Encyclopedia of Physical Science & Technology* (3rd ed.), editado por R.A. Meyers. New York: Academic Press.

Humphreys, P. 1997. "How properties emerge". *Philosophy of Science* 64: 1–17.

Jacob, F. 1970. *La logique du vivant. Une historie de l'hérédité*. Paris: Gallimard.

Jonas H. 1953. "A Critique of Cybernetics". *Social Research* 20: 172-192.

Jonas, H. 1966. *The Phenomenon of Life. Towards a Philosophical Biology*. New York: Harper and Row.

Kant, I. 1781/1978. *Crítica de la razón pura*. Traducido por Pedro Ribas. Madrid: Alfaguara.

Kant, I. 1790/1973. *Crítica del juicio*. Traducido por M. García Morente. México D.F.: Porrúa.

Karsenti E. 2008. "Self-organization in cell biology: A brief history". *Natural Reviews Molecular Cell Biology* 9(3): 255–262.

Kauffman, S. A. 2000. *Investigations*. Oxford: Oxford University Press.

Kauffman, S.A 1992. "Anticaos y adaptación". *Investigación y ciencia* 184 (enero): 46-53.

Kauffman, S.A. 1993. *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press.

Keller, E. F. 2008. "Organisms, machines, and thunderstorms: A history of self-organization, part one". *Historical Studies in Natural Sciences* 38 (1): 45-75.

Keller, E. F. 2009. "Organisms, machines, and thunderstorms: a history of self-organization, part two. Complexity, emergence, and stable attractors". *Historical Studies in Natural Sciences* 39(1): 1-31.

Keller, E. F. 2016. "Active matter, then and now". *History and Philosophy of the Life Science*. 38(3):11.

Letelier J-C., Soto-Andrade J., Guinez-Abarzua F., Cardenas M-L. y Cornish-Bowden A. 2006. "Organizational invariance and metabolic closure: analysis in terms of (M,R) systems". *Journal of Theoretical Biology* 238: 949-961.

Luisi, P.L. 2006. *The Emergence of Life. From Chemical Origins to Synthetic Biology*. New York: Cambridge University Press.

Maturana H.R., y Mpodozis J. 2000. "The origin of species by means of natural drift". *Revista chilena de historia natural* 73(2): 261-310.

Maturana, H., y Varela, F. 1984. *El árbol del conocimiento*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria. (English translation: *The tree of knowledge,* Boston, Shambhala, 1987).

Maturana, M., y Varela, F. 1973. *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria. (Sexta edición, coedición editorial Lumen, 2004).

Minati, G., y Pessa, E. 2006. *Collective beings*. New York: Springer.

Mossio, M., y Bich, L. 2017. "What makes biological organisation teleological?". *Synthese 194* (4): 1089-1114.

Mossio M., Saborido C. y Moreno A. 2009. “An Organizational Account of Biological Functions”. *British Journal of Philosophy of Science* 60(4): 813-841.

Moreno, A. Etxeberria, A. y Umerez, J. 1994. “Universality without matter?”. En *Artificial Life IV,* editado por R. Brooks y P. Maes, 406-410. Cambridge, MA: MIT Press.

Moreno, A. 2004. “Auto-organisation, autonomie et identité”. *Revue internationale de philosophie* 228: 135-150.

Moreno, A., Etxeberria, A. y Umerez, J. 2008. “The autonomy of biological individuals and artificial models”. *BioSystems* 91(2): 309–319.

Moreno, A., Ruiz-Mirazo, K., y Barandiaran, X. E. 2011. “The impact of the paradigm of complexity on the foundational frameworks of biology and cognitive science”. En *Philosophy of Complex Systems. Handbook of the Philosophy of Science*, editado por C. Hooker 311-333). Amsterdam: North Holland.

Moreno, A. y Mossio, M. 2015. *Biological autonomy: a philosophical and theoretical enquiry*. Dordrecht: Springer.

Newman, S. 2002. “Developmental mechanisms: putting genes in their place”. *Journal of Biosciences* 27(2): 97-104.

Nuño de la Rosa, L. y Etxeberria, A. 2010. “¿Fue Darwin el «Newton de la brizna de hierba»? La herencia de Kant en la teoría darwinista de la evolución”. *Endoxa* 24: 185-216.

Nicolis, G., y Prigogine, I. 1977. *Self-organization in nonequilibrium systems*. New York: Wiley.

Piaget, J. 1967. *Biologie et connaissance*. Paris: Gallimard.

Pickering, A. 2010. *The cybernetic brain: Sketches of another future*. Chicago: University of Chicago Press.

Pradeu, T. 2016. “Organisms or biological individuals? Combining physiological and evolutionary individuality”. *Biology & Philosophy* 31(6): 797-817.

Prigogine, I., y Stengers, I. 1979. *La nouvelle alliance: Métamorphose de la science*. Paris: Gallimard.

Rashevsky, N. 1960. *Mathematical Biophysics. Physico-Mathematical Foundations of Biology*. New York: Dover.

Rosen, R. 1972. “Some relational cell models: the metabolism-repair systems”. En *Foundations of Mathematical Biology*, editado por R. Rosen, 217-253. New York: Academic Press.

Rosen, R. 1978. *Fundamentals of measurement and representation of natural systems*. New York: North Holland.

Rosen, R. 1991. *Life itself: A comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. New York: Columbia University Press.

Rosenblueth, A., Wiener, N. y Bigelow, J. 1943. “Behaviour, Purpose and Teleology”. *Philosophy of Science* 10 (1): 18-24.

Ruiz-Mirazo, K. 2013. “Self-organization”. En *Encyclopedia of Systems Biology*, editado por W. Dubitzky, O. Wolkenhauer, KH. Cho, y H. Yokota, 1915-1919. New York: Springer.

Toepfer, G. 2011. “Selbstorganisation”. En *Historisches Wörterbuch der Biologie*, 271-304. Stuttgart: JB Metzler.

Turing, A. 1952. “The Chemical Basis of Morphogenesis”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 237: 37-72.

Turner, J. S. 2002. *The Extended Organism: The Physiology of Animal-Built Structures*. Cambridge MA: Harvard University Press.

Van der Vijver. 2006. “Kant and the Intuitions of Self-Organization”. En *Self-organization and Emergence in Life Sciences*, editado por B. Feltz, M. Crommelinck, y P. Goujon, 143-161. New York: Springer.

Varela, F. 1979. *Principles of Biological Autonomy*. New York: Elsevier North Holland.

Varela, F. J. y Maturana, H. 1972. “Mechanism and biological explanation”. *Philosophy of Science* 39 (3): 378-382.

Varela, F., Maturana, H., y Uribe, R. 1974. “Autopoiesis: the Organization of Living Systems, its Characterization and a Model”. *Biosystems* 5: 187-196.

Varela, F., Thompson E., y Rosch, E. 1991. *The Embodied Mind. Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge MA: MIT Press.

Varela, F.J. 1984. “Two principles for self-organization”. En *Self-organization and Management of Social Systems*, editado por H. Ulrich y G. Probst, 25-33. Berlin: Springer Verlag.

von Bertalanffy, L. 1949. *Das Biologische Weltbild: Die Stellung des Lebens in Natur und Wissenshaft*. Bern: Francke. (Versión en inglés: *Problems of Life: An Evaluation of Modern Biological Thought*. London: Watts & Co. 1952).

von Förster, H. 1960. “On self-organizing systems and their environments”. En *Self-organizing Systems*, editado por M.C. Yovits y S. Cameron. Oxford: Pergamon Press.

von Förster, H. y Zopf, G. 1962. *Principles of Self-Organization*. Oxford: Pergamon Press.

Waddington, C. H. 1968. “The basic ideas of biology”. En *Towards a theoretical biology: Prolegomena*, editado por C. H. Waddington, 1–41. Chicago: Adline.

Waddington, CH y Thom, R. 1968. “Correspondance”. En *Towards a Theoretical Biology*. *Vol. 1. Prolegomena*, editado por C. H. Waddington, 166-179. Edinburgh: Edinburgh Univeristy Press.

Weber A. y Varela F. J. 2002. “Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality”. *Phenomenology and the Cognitive Sciences* 1 (2): 97– 125.

Weiss, P. 1968. *Dynamics of development. Experiments and inferences*. New York: Academic Press.

Weiss, P. 1969. “The living system: Determinism stratified”. En *Beyond reductionism: The Alpbach symposium*, editado por A. Koestler y J. R. Smythies, 3–55. London: Hutchinson & Co.

Yates F.E. (Ed). 1987. *Self-organizing systems: the emergence of order*. New York: Plenum Press.

## 12 Cómo Citar ↑

Etxeberria Agiriano, Arantzazu y Bich, Leonardo. 2017. "Auto-organización y autopoiesis". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Auto-organización_y_autopoiesis

## 13 Derechos de autor ↑

DERECHOS RESERVADOS Diccionario Interdisciplinar Austral © Instituto de Filosofía - Universidad Austral - Claudia E.

Vanney - 2017.

ISSN: 2524-941X

## 14 Agradecimientos ↑

Agradecemos a los editores y a las personas que revisaron un borrador preliminar su paciencia y generosidad para proponer cambios y mejoras. Reconocemos la ayuda de los proyectos IT 590-13 del Gobierno Vasco y FFI2014-52173-P del Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España); y 637647 – IDEM de la *European Research Council* (ERC) bajo el programa *Horizonte 2020* de la UE (L. Bich).