

## ¿QUÉ ES LA VIDA?

*Definiendo la vida y la transición a la vida*<sup>1</sup>

*Este texto introduce de manera informal las ideas y los problemas de base que llevan a la cuestión de la definición de la vida y sus orígenes sobre la Tierra. Volveremos sobre los mismos temas en otros artículos de esta Sección ("Patrones de vida "y "Organismo») de maneras diversas, como círculos sobre un núcleo fundamental. Pero quedan aquí esbozados una primera vez en este libro.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Hace más de cincuenta años, el distinguido físico austríaco Erwin Schrödinger escribió un libro con el mismo título que este trabajo. Sin embargo, incluso antes de esa fecha, el intento por definir la vida se ha topado con actitudes de escepticismo o de condescendencia. Detrás de esta actitud negativa hay un argumento típico: semejante empresa no es ni útil ni fácil, ya que todos sabemos lo que es la vida, pero es imposible traducirlo en palabras. También se ha argumentado que la transición desde la no vida a la vida es un proceso continuo, y que por lo tanto, es imposible discriminar entre lo vivo y lo no vivo.

Este artículo hace frente a estas actitudes negativas e intenta proporcionar una definición científica de lo vivo. Hay unas cuantas buenas razones para ello. En primer lugar, nos enfrentamos al desafío de captar en una formulación explícita la cualidad de la vida: ¿cómo expresar aquello que comparten los microorganismos, las plantas, los animales, las callampas, y los hombres y que los diferencia del mundo inanimado de las rocas y las galaxias?

Además, la importancia de dar una definición de lo vivo debiese resultarles obvia a todos aquellos científicos que trabajan en el campo del origen de la vida y en modelos experimentales de células vivas mínimas. A decir verdad, parece difícil llevar a cabo este tipo de investigación sin tener una noción clara acerca de lo que es la vida en su forma mínima. Por extraño que parezca, las ciencias de la vida generalmente no establecen esta definición ni criterio, a pesar de la extensa literatura sobre los orígenes de la vida y los modelos explicativos de la vida.

Una definición de la vida también puede tener impacto en la investigación espacial: si enviamos sondas espaciales a un planeta lejano para buscar vida más allá de los confines de la tierra, ¿qué es lo que deben buscar? Claramente, también en este caso hay que tener algún patrón característico que nos permita reconocer la vida.

¿Cuáles deberían ser las propiedades de una "buena" definición de la vida? Nuestra posición es que ésta debe restringirse a la vida mínima, a la pregunta: ¿cuál es la unidad estructural más sencilla posible que encarna una definición de lo vivo? Al restringirnos a la vida mínima, obviamos el problema que plantean los desarrollos evolutivos posteriores del organismo y la vida multicelular. Esto también implica que en este estadio de la definición dejamos de lado propiedades emergentes tales como la inteligencia, la mente, la conciencia, y otras similares -

---

<sup>1</sup> (Luisi, L. Lazcano, A. and Varela, E (1996), Autopoiesis: the very idea, in: *Defining Life: The central problem in theoretical biology*, M. Rizzotti (Ed.), Universitá de Padova, Padova, PP. 146-167.) In Varela F. 2000 El fenómeno de la vida. Dolmen Ediciones, Santiago Chile. 474 p

ciertamente los atributos más maravillosos de la vida humana, pero desde luego no aquellos que simplifican la definición de la vida misma.

Estas puntualizaciones son insuficientes. Necesitamos otra, que en nuestra opinión -como autores y científicos que se interesan por la materia- constituye una de las principales fuentes de confusión e incompreensión entre los científicos cuando se trata de definir la vida. Se trata de lo siguiente: hay dos tipos de científicos que tratan de responder a la pregunta "¿qué es la vida?" con dos mentalidades muy diferentes. Uno de estos grupos está constituido por los biólogos, los genetistas, la mayoría de los biólogos moleculares, así como por los evolucionistas, para quienes la vida constituye principalmente un *fenómeno de población genética*: una generación de *E. coli* da origen a la siguiente generación de *E. coli*; una cultura de arvejas que produce la siguiente cultura; y del mismo modo para todos los animales y plantas. Esta es la vida en términos de continuidad histórica, una continuidad que sólo se ve perturbada a lo largo de una gran extensión de tiempo por diferentes cambios evolutivos que dan origen a novedades biológicas.

Pero hay otra perspectiva de la vida, una con la que están familiarizados los químicos y los físicos y en gran medida las personas que trabajan con la inteligencia artificial, aunque las fronteras no son tan claras. Esta es la perspectiva de la vida a nivel del *individuo, aquí y ahora*. El científico examina un solo espécimen (por ejemplo, un nuevo robot; o un complejo supramolecular sintético; o un solo espécimen de un nuevo tipo de medusa; o un espécimen de vida presunta en un planeta distante) y formula la pregunta: ¿está viva o no esta entidad? En este caso, el análisis se centra principalmente en un solo organismo sometido a examen y puede que los antecedentes históricos carezcan de importancia (a veces porque son desconocidos o porque no se pueden establecer). Este tipo de perspectiva local, centrada en "el aquí y el ahora", es la que exige un criterio para discriminar entre lo vivo y lo no vivo sobre una base más bien inmediata, sin esperar la reproducción (puede que ese espécimen particular sea estéril) o la evolución.

Todas estas puntualizaciones definen la esencia y los límites de este artículo. En primer lugar, nos restringiremos a la vida mínima; en segundo lugar, consideraremos, sobre todo, la definición de la vida a nivel del individuo, ya que la vida, en términos de la genética de una población, es más bien controversial. Sin embargo, nuestra intención es mostrar que ambos niveles están vinculados. Además, uno de los puntos fuertes de este artículo es que intenta proporcionar una definición de la vida, utilizando argumentos de "sentido común, partiendo del nivel de un lego inteligente que carece de instrumentos científicos y de un conocimiento de la biología molecular o celular. Luego veremos que esta definición macroscópica y de "sentido común de lo vivo a nivel de un solo individuo no difiere conceptualmente de la definición que podríamos dar sobre la base de un conocimiento de la biología celular.

## **2. EL NIVEL MACROSCÓPICO: CONVERSACIÓN CON UN EXTRATERRESTRE**

Para acercarnos al problema de la definición de la vida a nivel del individuo proporcionada por un lego inteligente sin conocimientos de biología celular o molecular, valgámonos de la metáfora que ya fuera utilizada por Oparin en otro contexto: supongamos que una criatura inteligente de Marte -un extraterrestre- visita la tierra para investigar las formas de vida que existen en nuestro planeta. Trae consigo una larga lista de cosas terrestres y quiere saber cuáles de ellas están vivas y cuáles no. Se encuentra con un granjero inteligente, pero científicamente ingenuo que, muy

rápidamente, separa los ítemes del extraterrestre en dos listas: (Tabla 1) cosas vivas (columna izquierda) y no vivas (columna derecha).

Hombre	radio
Árbol	automóvil
Gusano	computador
Mula	robot
Mosquito	luna
Coral	marea

**Tabla 1: Cosas vivas y no vivas**

El extraterrestre se muestra sorprendido por la seguridad con que el granjero discrimina entre ambas categorías, y quiere saber cuál es la cualidad que caracteriza a todas las cosas vivas (ítemes de la izquierda), y que está ausente en los de la derecha. También exige que esta cualidad pueda reconocerse en un tiempo corto, ya que sólo dispone de unos cuantos días libres. Cuando, apuntando a la gallina y a la mula, el granjero dice "movimiento" y "crecimiento", el extraterrestre disiente con la cabeza, ya que ni el árbol ni el coral se mueven, ni dan señales de crecimiento que puedan apreciarse en un tiempo de observación razonablemente largo; a la inversa, un trozo de papel se mueve con el viento y la luna y las mareas crecen en forma periódica. Cuando el granjero se vale del criterio "reacción ante los estímulos", el extraterrestre tampoco se muestra convencido: efectivamente, tanto la gallina como la mula y el hombre reaccionan ante el pinchazo de una aguja, pero la callampa y el árbol permanecen insensibles: y por otro lado, el computador y la radio pierden fácilmente su eficacia ante la interferencia de una aguja.

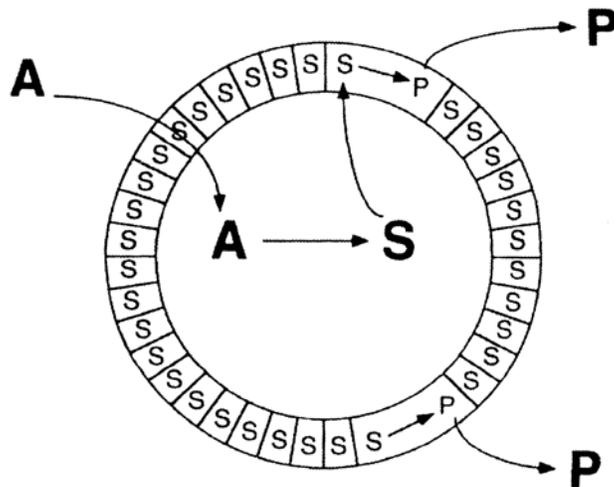
"Los seres vivos" -agrega el granjero que comienza a mostrar señales de irritación- "son capaces de realizar sus funciones gracias al consumo de alimentos y a la consiguiente producción de energía. La energía es transformada en acción por el propio organismo. Pero el extraterrestre señala que el auto y el robot son capaces de moverse haciendo precisamente lo mismo, transformando la energía en acción. "¡Reproducción!" -exclama el granjero. "¡Todos los ítemes en su lista son capaces de reproducirse! La gallina y el hombre son capaces de reproducirse, pero no así la mula" -replica con soma el extraterrestre. "Además, los niños humanos y los humanos muy ancianos no se reproducen: ¿acaso no están vivos?" "Bien, pero todos los ítemes de mi lista derivan de estructuras parentales" -dice el granjero. "¡Todas las cosas vivas tienen un ancestro: se originan de un ser vivo del mismo tipo!"

El extraterrestre se queda pensativo, pero no está convencido. "Supón -dice él- que encuentre una cosa aislada que se parece a un coral. No hay forma de saber si tiene ancestro; y no hay forma de saber si tendrá progenie. ¿Cómo puedo determinar que están vivos o no en un tiempo de observación relativamente corto?" Desea un criterio que le permita definir la vida aquí y ahora, sin tener que investigar el pasado o las generaciones futuras. ¿Que tienen en común todos los ítemes de la columna izquierda, a diferencia de los de la columna de la derecha?

El granjero, que ahora ha adoptado una actitud más reflexiva, le indica un árbol y señala que éste pierde sus hojas en invierno, pero que vuelve a generarlas a la primavera siguiente. El árbol se regenera desde su propio interior. Lo mismo ocurre con el pelo de muchos animales: ¡se cae y

vuelve a crecer nuevamente y crece gracias a una actividad que ocurre al interior del cuerpo! A partir de su propia experiencia, el granjero también sabe que cuando ayuna, o cuando está enfermo, sus miembros y sus órganos se vuelven un poco más pequeños: sin embargo, apenas comienza a comer nuevamente, sus miembros y sus órganos vuelven a crecer. Nuevamente, este crecimiento es fruto de una actividad que ocurre al interior de su propio cuerpo. Esto también debe ocurrir cuando el período de ayuno es muy corto -en otras palabras, el proceso de destrucción y regeneración de los tejidos debe ser un proceso continuo. Concluye que en todos los animales y plantas, a los que define como vivos, los tejidos sufren un proceso continuo de destrucción y regeneración fruto de algún tipo de actividad en su propio interior. ¡Los organismos vivos son capaces de albergar una actividad que regenera sus propios componentes!

Ahora el granjero se siente satisfecho: ¡finalmente ha logrado articular la cualidad que distingue a lo vivo de lo no vivo! El robot, el computador, la radio, la luna etc. son incapaces de regenerarse desde adentro. Si una parte de la radio se descompone, la propia radio es incapaz de construirla nuevamente. Sin embargo, todos los ítemes del lado izquierdo de la tabla poseen esta cualidad: utilizando la energía externa para mantener su propia estructura, y la capacidad para regenerarse desde el interior de la propia estructura. Parece que ésta es la propiedad de la vida que han estado buscando. El extraterrestre sonrío y traza una figura en el suelo con su lapicero láser (Figura 1). En esta figura, S representa un componente del sistema vivo, que está siendo transformado en un producto P; pero el sistema es capaz de regenerar a S, transformando los alimentos que ingresan al organismo nuevamente en S. Y, de este modo, el granjero y el extraterrestre llegan a la siguiente definición "macroscópica" de la vida: podemos decir que un sistema físico está vivo cuando es capaz de transformar la materia/energía externa en un proceso interno de automantención y autogeneración.



**Figura 1:** La definición del extraterrestre: este diagrama nos presenta en forma esquemática un organismo constituido por un solo "tejido" S. S se descompone y se transforma en P, pero gracias a la actividad interna del sistema, el nutriente A se transforma nuevamente en el tejido S. Esta representación pictórica corresponde a la siguiente definición de la vida: podemos decir que un sistema físico está vivo si es capaz de transformar la materia/energía externa en un proceso interno de automantención y autogeneración.

Esta definición y su correspondiente ilustración aparecen en la Figura 1: La vida sería respetada si el sistema mantiene su identidad, lo que significa que las dos tasas (transformación de A en S y de S en P) son comparables. La Figura 1 también ilustra la cualidad de la autorreproducción: si la tasa de conversión de A en S es mayor que la tasa de transformación de S en P, entonces el organismo crecerá, y finalmente se dividirá en dos. Pero la autorreproducción no es un prerequisite necesario para la vida. El extraterrestre se siente bastante contento con todo esto: se trata de una definición de la vida *hic et nunc* ("aquí y ahora"), una definición que no requiere la búsqueda o la espera de progenie. Para verificar esta definición sólo se requiere un tiempo de observación finito: el tiempo necesario para la autogeneración.

### 3. EL NIVEL CELULAR: INGRESA LA AUTOPOIESIS

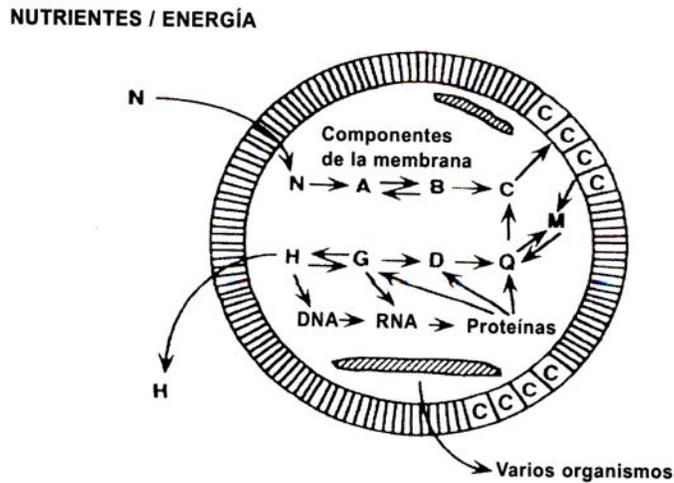
En la sección anterior, llegamos a una definición de la vida a nivel macroscópico y de sentido común, válida para un solo espécimen. Ahora intentaremos definir la vida en términos del patrón general de los organismos unicelulares, nuevamente a nivel de un solo individuo (la premisa de este artículo). Operacionalmente, necesitamos un microscopio y algunos métodos básicos de análisis bioquímico.

A decir verdad, si nuestros dos personajes, el granjero y el extraterrestre, hubiesen tenido acceso a un microscopio y a la tradición de la biología celular, habrían arribado de inmediato a una solución: todos los seres vivos están constituidos por células, lo que claramente no es el caso de los ítemes de la derecha en la Tabla 1. Obsérvese que a este nivel no es necesario disponer de información sobre la detallada estructura molecular de los componentes celulares. Por el momento, podemos dejar de lado gran parte de la biología molecular contemporánea.

Debemos estar conscientes de las limitaciones de este criterio científico. En primer lugar, se trata de un criterio experimental; es decir, su implementación requiere de una comunidad científica en que estas observaciones adquieren sentido. Va más allá del sentido común ya que supone una comprensión consensual de la vida celular. Además, el criterio se basa en la observación empírica que nunca hemos encontrado vida en la tierra desprovista de células -lo que es un supuesto (ya que pudo haber sido de otra manera durante el origen de la vida misma). Esta definición de la vida también es bastante tautológica: la vida es celular porque no hay vida sin células. Es evidente que para escapar de la tautología tenemos que definir las propiedades básicas de una célula en forma independiente -es decir, sin valernos de las propiedades de la vida. En otras palabras, tenemos que determinar cuáles son las propiedades químicas y físicas necesarias y suficientes para que una célula esté viva: este conjunto de requisitos mínimos debería, entonces, ser el núcleo de nuestra definición de la vida mínima.

Este salto conceptual fue introducido en los años 70 por H. Maturana y yo mismo con la proposición del concepto de *autopoiesis*, un neologismo acuñado de las raíces griegas para la autorreproducción. ¿En que se fundamenta? A partir del esquema de la figura 2, es evidente que una célula se caracteriza, en primer lugar, por una barrera o membrana semipermeable que establece un límite de difusión y permeabilidad que discrimina entre un interior químico (o *sí mismo*) y los medios libremente difusivos en el ambiente externo (*no-sí mismo*). Dentro de este límite, la vida celular es una red metabólica: basada parcialmente en nutrientes que ingresan desde el medio

exterior, una célula se mantiene mediante una red de transformaciones químicas. Pero -y este es el punto clave- la red de reacciones es capaz de regenerar los componentes que están siendo transformados, incluyendo aquellos que constituyen la barrera o membrana.



**Figura 2:** Ilustración esquemática de la lógica celular básica. Esta sencilla figura permite captar el patrón básico de la vida mínima, que se define del siguiente modo: (i) la vida es producto de una organización sistémica emergente, más que de una determinada estructura o reacción molecular; (u) la vida está ligada a la noción de automantención y de autorregeneración de los componentes del sistema; (iii) la barrera es de vital importancia para discriminar entre el *sí mismo* y el *no-sí mismo*, dando origen a un microambiente en el que puede ocurrir una determinada red de reacciones.

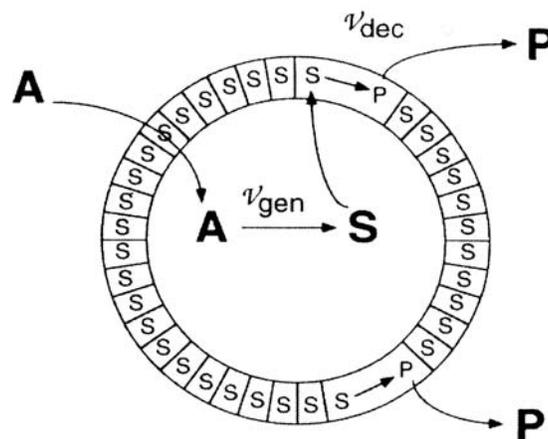
En otras palabras, la célula es capaz de automantención gracias a un patrón constitutivo o proceso de generación circular que reemplaza continuamente a los componentes que están siendo destruidos y recrea las condiciones para discriminar entre el sí mismo y el no-sí mismo. Claramente, esta pauta de organización básica podría presentarse en diferentes tipos de unidades, no exclusivamente en una célula básica tal como las conocemos. Esta organización mínima es lo que con Maturana denominamos una unidad autopoietica, la que se define más precisamente del siguiente modo:

*un sistema autopoietico está organizado (esto es, se define como una unidad) como una red de procesos de producción (síntesis y destrucción) de componentes., en forma tal que estos componentes: (i) se regeneran continuamente e integran la red de transformaciones que los produjo> y (ii) constituyen al sistema como una unidad distinguible en su dominio de existencia.*

Por supuesto, en una célula biológica estas reacciones no son procesos espontáneos, que ocurren al azar -en realidad, son controlados por ácidos nucleicos y las correspondientes enzimas

nucleicas ácidas. Sin embargo, este importante punto no modifica la esencia del patrón general que acabamos de describir, en el sentido que la descripción autopoiética de la vida mínima no depende de la estructura. Es de índole general, también podría aplicarse a una "vida no codificada"; por ejemplo a un sistema de vida artificial o a un sistema químico sintético desprovisto de ácidos nucleicos. En otras palabras, si bien la descripción autopoiética de la vida mínima se basa en una célula viva, define una pauta general de la cual la vida basada en un código ADN es tan sólo una expresión -aunque ciertamente la más relevante- para nuestra vida en la Tierra.

Nuevamente, podemos esquematizar todo lo anterior bajo la forma de una figura, y presentar el modelo más sencillo de una unidad autopoiética, como el que aparece en la Figura 3. Se trata de un sistema constituido por una sola barrera constituida por un solo componente S, y conteniendo sólo la reacción que lleva a la síntesis de S y a su descomposición. Dependiendo de la tasa relativa de formación y descomposición de S, la unidad autopoiética puede sufrir varios cambios cinéticos como, por ejemplo, la *autorreproducción*. Pero la pauta más general y más genuina es la de la automantención y la autogeneración. Obsérvese que formalmente la Figura 3 es similar a la sencilla Figura 1 del extraterrestre, pero esta vez valiéndose del conocimiento de la autoformación de una unidad provista de una barrera a la que hemos llegado en esta etapa del análisis.



$$v_{gen} = \frac{d[S]}{dt} \quad ; \quad v_{dec} = \frac{d[S]}{dt}$$

if  $v_{gen} = v_{dec}$       **homeostasis**

if  $v_{gen} > v_{dec}$       **autorreproducción**

**Figura 3:** Esquema de la unidad autopoiética más sencilla posible. En este caso, en contradicción con la Figura 1 del extraterrestre, la barrera es una estructura "físicamente especificada" es decir, es una membrana semipermeable o barrera. La figura 3 puede considerarse como una sobreesimplificación de la conducta celular ilustrada en la Figura 2.

Volvamos a repetirlo: la definición de autopoiesis define el esquema general de la vida sin hacer referencia alguna a la estructura de los componentes. El mundo del ADN, del ARN y de las

proteínas, que es tan básico para la vida tal como la conocemos en la Tierra, es tan sólo una implementación particular de esta organización autopoietica general.

La organización operacional de una unidad autopoietica es cíclica: los componentes moleculares que produce la red de reacciones internas se reúnen para constituir la unidad provista de una barrera semipermeable que determina un microambiente y la red de reacciones que vuelve a producir los componentes moleculares que... y así sucesivamente.

Esta unidad operacional autopoietica general aparece ilustrada en la Figura 4a, sin perjuicio del tipo de reacciones y de la naturaleza química de los componentes. En contraste, en la figura 4b la función que desempeñan las reacciones desencadenadas por el ADN se proporciona en forma explícita.

*Sorprendentemente*, hemos llegado a una definición que, al menos superficialmente, se aproxima a las conclusiones macroscópicas del extraterrestre. Sin embargo, en esta definición científica hay elementos nuevos y claves que están lejos de ser de sentido común. De vital importancia es el papel que desempeña la autodefinición de una unidad, que hace de la vida una propiedad emergente y no simplemente un agregado de cualidades. Lo que quiero decir con "emergente" es que la vida mínima puede ser explícitamente descrita como el resultado de una organización, no como el resultado de una reacción de determinados componentes. Esta organización define a la unidad: se trata realmente de una propiedad distribuida de la interacción entre la red metabólica y la membrana, donde las propiedades globales como la difusión determinan las reacciones químicas locales; sin embargo, son las reacciones químicas las que posibilitan la existencia del límite o barrera. Nada de esto es de sentido común y ni siquiera corresponde al pensamiento científico clásico, luego no podemos culpar al granjero por no dar de inmediato con esta definición.

¿Cómo se valida la autopoiesis? ¿Cuándo podemos decir que un sistema es autopoietico, y que constituye, por lo tanto, un ejemplo de vida mínima? La ventaja de una definición explícita es que ahora podemos proporcionar ciertos criterios de validación, que aquí resumiremos en tres:

1. Borde semipermeable: Verifique que el sistema se define por un límite o borde semipermeable constituido por componentes moleculares que permite discriminar entre el interior y el exterior del sistema en relación con los componentes relevantes del sistema. Si es así, proceda con el criterio 2.
2. Red de reacciones: Verifique que los componentes de la barrera son producto de una red de reacciones que opera al interior de la barrera. Si la respuesta es afirmativa, proceda con el criterio 3.
3. Interdependencia: Verifique que la red de reacciones es regenerada por condiciones producidas por la existencia de la misma barrera, es decir, que 1 y 2 son interdependientes. Si es así, el sistema es autopoietico.

Aplicando estos criterios, se puede determinar si un sistema es autopoietico, es decir, si está vivo o no, incluso a un nivel en que la definición de la vida de sentido común ya no aporta

gran cosa. En la Tabla 2 se analizan una serie de "objetos" en términos de los tres criterios arriba mencionados.

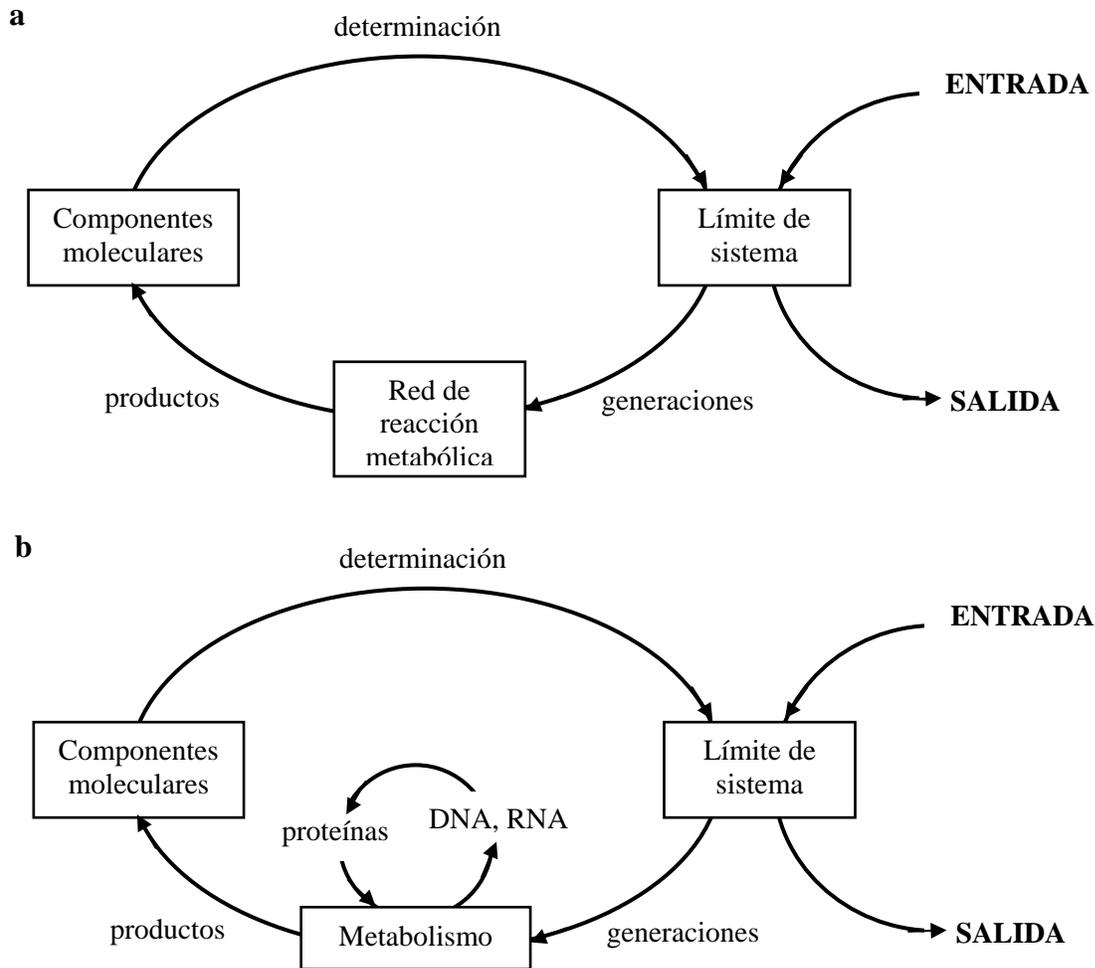
Objeto	Criterio 1: límite	Criterio 2: red	Criterio 3: interdependencia	Conclusión
Virus	sí	no	no	no
Cristal	no	no	no	no
Amebas	sí	sí	sí	sí
Mitocondrias	sí	sí	no	no
sección de ADN	no	no	no	no

**Tabla 2: Vivo o no vivo, de acuerdo a los criterios de la autopoiesis**

De este modo, un virus es una estructura provista de un borde, y satisface el criterio número uno, pero no así el segundo, ya que los componentes del virus no son generados al interior de la estructura del virus, sino en el exterior, en la célula huésped. Del mismo modo, un cristal que crece no está vivo, ya que los componentes del sistema no se generan desde adentro: aunque una sola molécula se replique a sí misma, no podemos decir que está viva, ya que el sistema no está dotado de una barrera semipermeable.

Observemos que a este nivel autopoietico de la definición de la vida, la evolución darwiniana no aparece como criterio de lo vivo. Esto, no porque esta propiedad no sea importante, sino simplemente porque la evolución es un hecho observable que requiere de un conjunto de unidades o entidades definidas en que el proceso de selección puede ocurrir, es decir, éste es el nivel que definimos en la introducción a nivel de la genética de una población. Es importante ahora que examinemos la relación entre los dos niveles y definiciones que mencionamos en la introducción de este trabajo, para ver cómo se relacionan entre sí. Creemos que la relación es lógicamente bastante sencilla: el nivel individual de la organización autopoietica representa el patrón general de la vida mínima, válido tanto para la vida codificada y la no codificada (por ejemplo, la vida artificial) y que requiere de una población de unidades autopoieticas caracterizada por el material genético para implementar la vida a nivel de la población genética. En otras palabras, una definición de la vida que da cuenta de la individualidad es empírica y lógicamente anterior a una secuencia evolutiva. Es totalmente posible que hayan surgido muchos sistemas vivos que no dieron origen a una descendencia viable. Por supuesto, se podría argumentar que sin evolución no hay verdadera vida, pero lo que aquí nos hemos propuesto es explorar los beneficios de establecer una separación entre el individuo y las series de tiempo. En la definición que aquí proponemos, la evolución, y la evolución darwiniana en particular, es más bien la consecuencia de la vida y no su causa.

Del mismo modo, obsérvese que el problema del origen de la vida claramente constituye el núcleo de esta discusión sobre la definición de la vida. Pero obsérvese también que el problema de cómo y cuándo se inició realmente la lógica circular de la autopoiesis en la historia de la vida sobre la Tierra, y con qué componentes moleculares específicos, es un problema totalmente diferente.



**Figura 4:** La circularidad del sí mismo en la organización autopoiética: En sus relaciones operacionales, los componentes moleculares determinan una red dinámicamente organizada y enlazada de transformación (metabolismo), que produce los componentes moleculares de la membrana, lo que, a su vez permite la operación de la red, y así sucesivamente. En nuestro mundo biológico, todo el sistema de reacciones está regulado por los ácidos nucleicos, como aparece graficado en la figura 4b. Tal como se señaló en el texto, la figura 4a representa el patrón más general, válido también para una vida «no codificada» (en la vida artificial o en los sistemas químicos sintéticos).

Ahora bien, retrocedamos un poco y comparemos la definición de sentido común del extraterrestre y la definición autopoiética basada en la vida mínima. A juzgar por la representación pictórica (ver Figuras 1 y 3), hay una gran semejanza entre ambas. Sobre esta base, surge la tentación de decir que una cosa viva, macroscópica, no es más que una gigantesca unidad autopoiética, en que la envoltura externa del cuerpo físico -la piel- representa el límite. Pero no es tan simple. *La autopoiesis* se refiere y se limita a la vida mínima; es decir, su teoría y sus principios se basan en los organismos unicelulares. No se habla de organismos multicelulares o de jerarquías de autopoiesis. Uno podría describir una jerarquía de subsistemas autopoiéticos: por ejemplo, un órgano como el corazón o el hígado podrían ser considerados como una jerarquía de segundo orden, el animal entero como de tercer orden y así sucesivamente. Pero queremos ser rigurosos en el uso de la terminología y de las definiciones: los agregados de unidades

autopoiéticas no necesariamente son autopoiéticos y, por lo demás, generalmente no lo son, así como los agregados de cuerpos humanos en una sociedad no constituyen un cuerpo humano en un orden superior. Este problema merece un análisis más profundo, pero que va más allá del propósito de este trabajo.

#### 4. LA VIDA A NIVEL DE LAS "MOLÉCULAS VIVAS"

La perspectiva autopoiética es esencialmente una perspectiva celular de la vida mínima. El problema que ahora hay que abordar es si la unidad celular es necesaria para una definición de la vida. Olvidémonos de la célula y observemos los mecanismos moleculares del ARN, el ADN y los ribosomas: ¿acaso no es esto suficiente para captar la esencia de la vida, para definir lo que es la vida? En otras palabras, ¿por qué no podemos definir la vida, en su expresión mínima, en términos de ciertas clases moleculares, tal como proponen algunos investigadores contemporáneos?

Esta pregunta ha cobrado gran importancia en los últimos diez años, desde el descubrimiento de los ribosomas por Cech, e independientemente, por Altman. Según parece, aquí teníamos en la misma molécula simultáneamente la capacidad de catálisis enzimático y el contenido de información de los ácidos nucleicos. La pregunta que uno frecuentemente escucha es entonces la siguiente: supongamos que tenemos en un tubo de ensayo una molécula de ARN que es capaz de replicarse a sí misma autocatalíticamente y evolucionar por mutación: ¿no sería ésta una molécula viva?

Quisiera hacer algunas puntualizaciones antes de proceder con este análisis. Primero, hay que dejar de lado la noción de una "sola molécula" a favor de una población de moléculas. De hecho, si una sola molécula evolucionara, se transformaría, por definición, en una molécula diferente -ya no sería la molécula original. Entonces deberíamos hablar, por lo menos, de una gran familia de moléculas, para que la noción darwiniana de variación y evolución pueda aplicarse en forma más correcta. En este sentido, dejamos atrás el nivel de un solo individuo para volver al nivel de la población genética y del desarrollo histórico de la vida, el que, como señalamos al comienzo, no es el propósito de este artículo. Habiendo hecho este alcance, habrá todavía que preguntarse si algunos de los ejemplos que se proporcionan en relación con el ARN no constituyen ejemplos de moléculas vivas. En particular, la definición de lo vivo, en este caso, sería: *un sistema ARN (o ADN) que es capaz de replicarse a sí mismo autocatalíticamente y de mutar en este proceso*. El punto importante que se relaciona con nuestro artículo es que en esta definición no hay ninguna noción de límite, de membrana celular, o más generalmente de una unidad emergente. Los que adhieren a esta escuela no niegan la importancia del límite, pero sólo lo consideran como un paso más que permite una autorreplicación más eficiente y no como un prerequisite esencial.

Varios de estos sistemas han sido recientemente descritos por las escuelas de Joyce, Szostk y colaboradores, aunque no han expresado explícitamente una definición de la vida. Hay consecuencias interesantes que se desprenden de esta perspectiva acerca de la vida mínima. Por ejemplo, podría entonces también considerarse que los dinucleótidos de Rebek, que son capaces de autorreplicarse y de mutar, están vivos. Y esto nos lleva a preguntarnos si otras especies moleculares -como, por ejemplo, los oligómeros de poliestireno- que en el proceso podrían

transformarse en autorreproductores y capaces de mutación, por ejemplo al ser oxidados, también están vivos. Pareciera que esto plantea más problemas de los que resuelve: la definición anterior probablemente debería restringirse al ADN o al ARN -debiera ser considerada como una definición de lo vivo que es dependiente de la estructura (ADN y ARN) más que dependiente del patrón (el patrón de la autorreproducción y de la mutación). En la definición autopoietica de lo vivo ocurre todo lo contrario: lo esencial es el patrón, no la estructura. En este sentido, la definición autopoietica de lo vivo y la definición de lo vivo de la biología molecular difieren radicalmente.

Es en este punto cuando el problema de la validez de las definiciones adquiere relevancia. Como dijimos al comienzo, hay diferentes niveles desde los cuales podemos considerar/definir lo vivo: podemos buscar una definición basada en la conducta de los imputados -seres vivos vistos desde afuera- sin analizar los mecanismos que operan dentro del organismo. En ese caso, la definición de sentido común del extraterrestre resulta bastante adecuada para la vida a nivel macroscópico: y la perspectiva autopoietica constituye una buena definición del patrón más general de la vida celular mínima. Si queremos una definición de la vida mínima que haga referencia explícita a la continuidad genética y a la evolución de los procesos vitales en esta Tierra, entonces es necesario hacer referencia a los ácidos nucleicos. Obsérvese también que, por principio, cada definición debe necesariamente establecer una discriminación -la línea discriminatoria tiene que pasar por algún punto y puede que algunas personas estén disconformes con las consecuencias (por ejemplo, que se diga que un virus no está vivo): también, como toda definición, permite algunos casos fronterizos, en que la discriminación entre lo vivo y lo no vivo puede ser conflictiva.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bachmann, PA., Luisi, PL., y Lang, J. Autocatalytic self-replicating micelles models for prebiotic structures. *Nature*, 357:57-59, 1992.
- Bachmann, PA., Walde, P., Luisi, PL., y Lang, J. Self-replicating micelles and chemical autopoiesis. *Journal of the American Chemical Society*, 112:8200-8201, 1990.
- Bachmann, PA., Walde, P., Luisi, PL., y Lang, J. Self-replicating micelles: Aqueous micelles and enzymatically driven reactions in reverse micelles. *Journal of the American Chemical Society*, 113:8204-8209, 1991.
- Bernal, J.D. En T. Waterman y H.J. Morowitz, (Eds.), *Theoretical and Mathematical Biology*, 1965.
- Biebricher, C.K., Eigen, M., y McCaskill, J.S. Template-directed and template-free RNA synthesis by QB replicase. *Journal of Molecular Biology*, 231:175-179, 1993.
- Fleisliaker, G.R. Autopoiesis: the status of its system logic. *Bio Systems*, 22:37-49, 1998.
- Hargreaves, WR. y Deamer D.W. Liposomes from ionic, single-chain amphiphiles. *Biochemistry*, 18:3759-3768, 1978.
- Luisi, PL. Defining the transition to life: self-replicating bounded structures and chemical autopoiesis. En *Thinking about Biology*. Addison-Wesley, 1993.
- Luisi, PL. y Varela, EJ. Self-replicating micelles - a chemical version of a minimal autopoietic system. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19:663-643, 1989.
- Maturana, H.R. y Varela, EJ. *Autopoiesis and Cognition The Realization of the Living*. H.D. Reidel, Dordrecht, Holanda, 1980.
- Oparin, A.L., Serebrovskaya, K.B., Pantskhava, S.N., y Vasileva, N.Y. Enzymatic synthesis of polyadenylic acid in coacervate drops. *Biokhimiya*, 28(4):671-675, 1963.

Park, T.K., Peng, Q., y Rebek j, Jr. Synthetic replicators and extrabiologic chemistry. *Journal American Chemical Society*, 114:4529-4532, 1992.

Perret, M. *New Biol.*, 12:68, 1952.

Rebek, Jr. J. Molecular recognition and the development of self-replicating Systems, *Experientia*, 47:1069-1104, 1991.

Stein, W y Varela EJ. SF1 studies in the science of complexity, Lect. Note Vol. III. Technical report.

Varela, EJ. *Principles of BiologicalAutonomy*. North Holland, Nueva York, 1979.

Varela, EJ., Maturana, H.R., y Uribe R. Organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems*, 5:187-196, 1974.

von Kiedrowski, C. Ein selbstreplizierendes Hexadesoxynucleotid. *Angewandte Chemie*, 98:932-934, 1986.

von Kiedrowski, G., Wlotzka, B., y Helbing, J. Sequenzabhängigkeit matrizengesteuerter Synthesen von Hexadesoxynucleotid-Derivaten mit 3'-5'-Pyrophosphatverknüpfung. *Angewandte Chemie*, 101:1259-1261,1989.