

Gaia y la ciencia de la sostenibilidad: del programa ontológico al paradigma científico¹

Ignacio Ayestarán
Universidad del País Vasco
ignacio.ayestaran@ehu.es

Resumen

Este artículo analiza el estatus científico de la teoría Gaia en relación al objetivo de la Ciencia de la Sostenibilidad global. La ciencia de los sistemas autorreguladores y autopoieticos (propuesta por Lovelock y Margulis) ha supuesto una nueva visión de la vida sobre la Tierra siguiendo un programa heurístico y ontológico. En la segunda parte de este artículo explicamos que este programa ha inspirado al paradigma emergente de la "Ciencia del Sistema Tierra", a la búsqueda de una Ciencia de la Sostenibilidad global.

Palabras clave: Gaia, Paradigma, Sostenibilidad, Ciencia, Tierra, Sistema, Ontología

Abstract

This article analyzes the scientific status of the Gaia theory related to the aim of a global Sustainability Science. The science of the self-regulating and autopoietic systems (proposed by Lovelock and Margulis) has been a new look at life on Earth following a heuristic and ontological programme. In the second part of this article we explain that this programme has inspired the emerging paradigm of the "Earth System Science", in search of a global Sustainability Science.

Keywords: Gaia, Paradigm, Sustainability, Science, Earth, System, Ontology

La teoría Gaia como hipótesis y programa ontológico

Ideada por el químico atmosférico James Lovelock, defendida por la microbióloga Lynn Margulis y bautizada por el novelista William Golding, la hipótesis Gaia sostiene que la composición de todos los gases reactivos, así como la temperatura de la parte más baja de la atmósfera, han permanecido relativamente constantes durante eones. En la reformulación de la investigación sobre Gaia caben dos posturas: una teoría fuerte y otra débil (Margulis, 2002). La teoría Gaia "débil" mantiene que el medio ambiente y la vida están emparejados y coevolucionan. La teoría Gaia "fuerte" afirma que el planeta, con la vida que hay en él, es un único sistema viviente y está regulado en ciertos aspectos por esa vida.

Con el tiempo Lovelock ha ido diluyendo su propuesta de la teoría fuerte de Gaia, sobre todo por las dificultades de expresar las funciones teleológicas de las especies y de los seres vivos, para ir aceptando, sin embargo, que lo que en un principio era una hipótesis heurística de investigación se podía transformar

¹ Trabajo realizado dentro del proyecto de investigación UNESCO08/20, financiado por la Cátedra UNESCO de Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental de la UPV/EHU.

finalmente en una teoría científica o, por lo menos, de inspiración científica. Esta hipótesis heurística inicial viene a redefinir el estudio de los mecanismos del planeta en su globalidad. En pocas palabras, lo novedoso de esta propuesta se explicita de la siguiente manera: el rendimiento energético del sol y las reglas de la química y la física deberían determinar las propiedades de la superficie de la Tierra, pero las investigaciones han ido mostrando que estas propiedades se desvían significativamente de las predicciones basadas únicamente en la física y la química. Sólo cuando se toman en consideración las polifacéticas funciones e interacciones de los organismos vivos productores de gas y modificadores de la temperatura, las disparidades desaparecen o adquieren un sentido explicativo (Margulis, 2002, pp. 145-146).

Antes de proseguir con la teoría Gaia, y aún admitiendo que la ciencia es un producto propio de los seres humanos (no hemos descubierto, hasta la fecha, otros seres capaces de hacer ciencia o de convertirse en científicos), debemos reconocer que el sesgo antropocentrista en algunas ocasiones pueden ofuscar los resultados de las investigaciones. Muchas veces nos precipitamos en la manera en que el ser humano debe enfrentarse a una ciencia de la sostenibilidad global. Con frecuencia olvidamos, por ejemplo, el breve lapso de tiempo que ha permanecido el ser humano sobre la Tierra. Siguiendo a Jacques Girardon (2001), si redujéramos toda la historia global de nuestro planeta a un siglo (por caso, el siglo XX) y aceptáramos que nuestro planeta naciera el 1 de enero de 1900, y si conservamos la misma proporción del tiempo, la vida aparecería en 1923. Entonces la vida era vegetal y, desde luego, extraordinariamente primitiva, pues esas primitivas algas unicelulares no tuvieron núcleo hasta el año 1986, por seguir con el símil. Las plantas se independizan del mar y se adaptan a tierra firme por primera vez en 1991. A partir de entonces la marcha se acelera: desde 1994 empiezan a crecer las coníferas. Los mamíferos aparecen en 1996 y, a continuación, las plantas con flores en 1998. Los restos de los primeros antropoides los situamos hacia julio de 1999 y, seis meses más tarde, comienza la época del *Homo Sapiens*: hacia el final de la tarde del 31 de diciembre. En ese mismo día de Nochevieja, el 31 de diciembre de 1999, a las 22 horas y 4 minutos, es decir, 1 hora y 56 minutos antes de dar el reloj las doce campanadas del tiempo presente, las personas del Neolítico inventan la agricultura. Y a partir de ahí, empiezan a desarrollarse la mayor parte de invenciones y acontecimientos que han conformado la mayor parte de los libros de historia de la

humanidad. Sin embargo, estos 116 minutos no deberían ocultar la historia de los minutos, horas y días que han conformado la historia de nuestro planeta previamente.

Dicho esto, volviendo a la teoría Gaia, ésta propone una visión conjunta de la evolución planetaria en relación al fenómeno de la vida. Así, la estrecha interrelación entre la vida y su ambiente incluye los siguientes cuatro puntos (Lovelock, 1993, p. 53):

- 1- Organismos vivos que crecen de forma vigorosa, explotando cualquier oportunidad ambiental posible.
- 2- Organismos que están sujetos a las reglas darwinianas de la selección natural: las especies de organismos que dejan más descendientes supervivientes.
- 3- Organismos que afectan a su ambiente físico y químico y lo modifican incesantemente. Así, los animales modifican la atmósfera mientras respiran tomando oxígeno y exhalando dióxido de carbono, mientras las plantas y las algas realizan el proceso inverso.
- 4- La existencia de limitaciones o conexiones que establecen los límites de la vida. Por caso, puede hacer demasiado calor o demasiado frío, sin embargo, entre los dos extremos existe una temperatura adecuadamente templada, el estado óptimo. Casi todos los productos químicos tienen un margen de concentración tolerable o necesario para la vida. Puede haber demasiada acidez o demasiada alcalinidad, pero es preferible la neutralidad. Para muchos elementos, tales como el yodo, el selenio y el hierro, la sobreabundancia es un veneno, y la escasez produce inanición. Asimismo, el agua pura no contaminada permitirá el desarrollo de pocas formas de vida, mientras que las salmueras saturadas del Mar Muerto tampoco dejan proliferar las diversas formas de vida.

A estas cuatro condiciones de la interrelación entre la vida y su ambiente, la teoría Gaia pone énfasis en una visión de la Tierra basada en los siguientes cuatro ítems (Lovelock 1993, p. 78):

- 1- La vida es un fenómeno a escala planetaria. A esta escala es casi inmortal y no tiene necesidad de reproducirse.

2- Los organismos vivos no pueden ocupar un planeta parcialmente. La regulación del medio ambiente requiere la presencia de un número suficiente de organismos vivos, de forma que, cuando la ocupación es parcial, las fuerzas inevitables de la evolución física y química pronto lo convierten en inhabitable.

3- La interpretación de la gran visión de Darwin ha cambiado. Gaia subraya la falibilidad del concepto de adaptación. Ya no es suficiente decir «organismos mejor adaptados que otros tienen más probabilidad de dejar descendencia». Es necesario añadir que el crecimiento de un organismo afecta a su ambiente físico y químico: por tanto, la evolución de las especies y la evolución de las rocas están estrechamente ligadas como un proceso único e indivisible.

4- La ecología teórica se ha ampliado. Tomando conjuntamente las especies y su ambiente físico como un solo sistema, por primera vez se pueden construir modelos ecológicos que son matemáticamente estables y que, sin embargo, incluyen un gran número de especies en competición. En estos modelos el incremento de la diversidad entre las especies da lugar a una mejor regulación.

Esta formulación madura de los puntos que presuponen la propuesta científica de Gaia no se corresponde directamente con los inicios de las hipótesis de Lovelock. Al principio, Lovelock llegó a pensar la hipótesis de Gaia como una “medicina planetaria”, estableciendo un paralelismo hipotético entre el examen que realiza un médico a sus pacientes y el que haría un médico planetario. Para ello se interrogaba sobre cuáles son los instrumentos utilizados en medicina y sobre qué muestras se toman para efectuar un análisis bioquímico o una biopsia. La tabla siguiente da una lista de algunos de esos instrumentos y métodos comparativos que establecía Lovelock:

| Herramientas y métodos en la medicina planetaria y humana (Lovelock 1992, p. 13) | | |
|--|---------------|----------------|
| Medida | Humano | Planeta |

| | | |
|------------------------|----------------------------|--|
| | | |
| Temperatura | Termómetro clínico | Radiómetro de satélite |
| Presión de la sangre | Esfigmómetro | Barómetro |
| Respiración | Estetoscopio | Monitores atmosféricos de dióxido de carbono |
| Pruebas de bioquímicos | Muestras de sangre y orina | Muestras de aire y mar |
| Biopsia | Muestras del tejido | Estudios del ecosistema |

Lovelock establecía entonces la analogía de la enfermedad planetaria: consideraba como una enfermedad el hecho de que durante la historia de la Tierra haya habido períodos de trastornos para el sistema y de dificultades para los organismos que lo habitaban. Los impactos de enormes meteoritos o el cambio en el estado atmosférico cuando el oxígeno se hizo dominante eran dos buenos ejemplos de esas inestabilidades enfermizas para el planeta. Actualmente, se atrevía a sugerir Lovelock, la presencia de los seres humanos y sus productos contaminantes crea otra gran inestabilidad cercana a la categoría de enfermedad planetaria.

El poder de la metáfora de la “enfermedad planetaria” resultaba práctico, según Lovelock, si se extendía hasta la idea de considerar los mecanismos planetarios como una gran ingeniería global para estudiar el estado de salud de la Tierra desde el fenómeno de la vida planetaria:

Los ingenieros diseñan máquinas cuyos fallos amenazarían la vida: como prevención, incluyen los llamados “monitores de salud de la máquina”. Así, los motores y los mecanismos de rotación de los helicópteros incorporan unos mecanismos de seguridad, que se activan ante los primeros síntomas de fallo, para advertirnos a tiempo y evitar un desastre. Que ningún biólogo considere un helicóptero como una forma de vida no invalida el enfoque del ingeniero.

Al diseñar un sistema de detección de averías para una máquina, el ingeniero debe tener un conocimiento detallado y práctico del funcionamiento de la máquina como sistema completo. El médico necesita un conocimiento similar sobre el funcionamiento del sistema humano, pero también acerca de los procesos peculiares de los sistemas vivos en general: el nacimiento, el crecimiento, la curación, la muerte... Para comprender la salud de Gaia, un médico planetario no sólo necesita las habilidades y los recursos prácticos del médico, sino también los del ingeniero.

Aunque no se acepte que el sistema y su medio ambiente sobre la Tierra, lo que yo llamo Gaia, está vivo -vivo como un árbol-, sin duda se admitirá que está más vivo que un helicóptero o una máquina (Lovelock, 1992, p. 13).

Así, Lovelock llegó a forjar la idea de que Gaia era una “ciencia para curar el planeta”, en una extraña metáfora que postulaba tanto rasgos antropocéntricos como anti-antropocéntricos, pues no queda nada claro qué pueda significar una “medicina planetaria” más allá de los propios seres humanos que han inventado el arte y la ciencia de la medicina. De aquella propuesta inicial, no obstante, lo más interesante es su preocupación por apelar a una definición de la “vida” como fenómeno planetario específico. De acuerdo con su propuesta un organismo está vivo si se cumplen los siguientes requisitos (Lovelock 1992, p. 30):

- Tiene definidos sus límites exteriores o sus fronteras.
- Absorbe energía libre, sea la luz del Sol o la energía química potencial almacenada en los alimentos.
- Excreta productos residuales, altos en entropía.
- Mantiene un alto nivel de desequilibrio interno.
- Mantiene un medio interno constante, a pesar de las condiciones externas.

La tabla siguiente compara algunas de las características observadas comúnmente en varios tipos de organismos vivos con los de pequeños ecosistemas, como un panal, y con lo que sería Gaia, como una forma de vida global a escala planetaria:

| Análisis de las formas de la vida en la Tierra (Lovelock 1992, p. 30) | | | | | |
|--|-----------------------|----------|-------|-------|------|
| Características | Formas de vida | | | | |
| | Bacteria | Mamífero | Árbol | Panal | Gaia |
| Reproducción | + | + | + | - | - |
| Metabolismo | + | + | + | + | + |
| Evolución | + | + | + | + | + |
| Termostasis | - | + | - | + | + |
| Quimiostasis | + | + | + | - | + |
| Autocuración | + | + | + | + | + |

La preocupación por la definición del fenómeno de la vida en la Tierra procede del primer libro de Lovelock, antes de acuñar el término de Gaia incluso. En ese momento Lovelock llegó a pensar el estudio de la Tierra a semejanza de un gigantesco sistema cibernético, que denominaba “Sistema de Homeostasis y Biocibernética Universal”. Por aquel entonces llegó a sugerir que este sistema cibernético y homeostático era el proceso fundamental de regulación de la vida:

Hasta aquí hemos definido a Gaia como una entidad compleja que comprende el suelo, los océanos, la atmósfera y la biosfera terrestre: el conjunto constituye un sistema cibernético autoajustado por realimentación que se encarga de mantener en el planeta un entorno física y químicamente óptimo para la vida. El mantenimiento de unas condiciones hasta cierto punto constantes mediante control activo es adecuadamente descrito con el término «homeostasis» (Lovelock 1985, p. 24).

Esta capacidad de autorregulación y autoajuste, propia de los sistemas cibernéticos, es una de las propuestas que han sido reforzadas posteriormente por Lynn Margulis a través de la caracterización de la vida como proceso autopoiético. Margulis asume que los sistemas cibernéticos son direccionales y que mantienen activamente en una constante variables especificadas a pesar de que haya influencias perturbadoras. Margulis precisa más que Lovelock en su análisis de los sistemas cibernéticos, al indicar tanto los procesos de homeostasis como de homeorresis (Margulis 2003, pp. 261-262). Los sistemas cibernéticos son homeostáticos si sus variables -como la temperatura, la dirección, la presión, la intensidad de la luz y otras- aparecen reguladas alrededor de un conjunto de puntos fijados. Si el punto de referencia por sí mismo no es constante sino que cambia con el tiempo, recibe el nombre de punto operativo. Los sistemas con puntos operativos en lugar de puntos fijados son homeorréticos en vez de homeostáticos. A juicio de Margulis, tanto los sistemas reguladores de Gaia como los embriológicos se describen con más propiedad como homeorréticos.

A la caracterización de estos sistemas cibernéticos como homeorréticos Margulis añade que son también, de algún modo, autopoiéticos. Siguiendo a Gail Rainey Fleischaker, Margulis propone aplicar por los menos cinco criterios de autoipoiesis: 1) que se puedan identificar límites alrededor de componentes discretos; 2) que la entidad autopoiética sea un sistema material en el que las

interacciones y transformaciones de sus componentes estén determinadas por las propiedades de los componentes; 3) que los límites de la entidad estén determinados por las relaciones entre sus componentes; 4) que los componentes de los límites sean producto de las interacciones y transformaciones de los componentes; y 5) que los componentes del sistema se produzcan por interacciones y transformaciones de los componentes. Así establece la siguiente tabla (Margulis 2003, p. 117):

| Criterios de la autopoiesis (Margulis 2003, p. 117) | | |
|---|---|---|
| Criterios | Resumen | Vida actual |
| Límites identificables alrededor de componentes discretos | Identidad del sistema; materialmente abierto | Células con membrana plasmática |
| La entidad es un sistema material en el que las interacciones y transformaciones de sus componentes están determinadas por las propiedades de los componentes | Operaciones fisicoquímicas | Metabolismo celular que comprende la regulación iónica en la membrana (K^+ , N^+ , H^+ , OH^- , Cl^-) |
| Los límites de la entidad están determinados por las relaciones entre sus componentes | Límites automantenidos | El metabolismo celular construye la membrana plasmática |
| Los componentes de los límites son producto de las interacciones y transformaciones de los componentes | Los componentes son producidos, transformados y organizados por el sistema a partir de fuentes externas | Fuentes externas de C, H, N, O, P, S, etc., organizadas por vías multienzimáticas dirigidas por genes, lo cual mantiene la célula y genera residuos |
| Los componentes del sistema se producen por interacciones y transformaciones de los componentes | En las interacciones entre los componentes del sistema hay una transducción de energía | La transformación energía / materia se produce por: foto-/químico-, auto-/hetero- o lito-organotrofia |

Para Margulis es palmario que los animales y los demás seres de la biota de la Tierra muestran propiedades de automantenimiento que los caracterizan como entidades autopoieticas. La entidad autopoietica más pequeña reconocible es una

bacteria, mientras que la mayor es Gaia, “el sistema regulador organismos-ambiente en la superficie de la Tierra, constituida por más de treinta millones de especies” (Margulis 2003, p. 116). Siguiendo a Humberto Maturana, Francisco Varela y Gail Rainey Fleischaker, Margulis resume que la autopoiesis se refiere a las propiedades de autocreación y de automantenimiento, pues los sistemas autopoieticos, a diferencia de los meramente mecánicos e inertes, producen y mantienen sus propios límites (membranas plasmáticas, piel, exoesqueletos, corteza, etc.). Dichos sistemas modulan incesantemente su composición iónica y sus secuencias macromoleculares -los residuos de aminoácidos y nucleótidos de sus proteínas y ácidos nucleicos-, incluso algunos sistemas autopoieticos regulan su temperatura interna. Las propiedades de los sistemas autopoieticos empleadas por Margulis se reflejan en la siguiente tabla:

| Propiedades de los sistemas autopoieticos (Margulis 2003, p. 281) | | |
|--|---|---|
| Propiedad | Aspecto | Ejemplos de correlaciones bioquímicas /metabólicas |
| Identidad | Límites estructurales; componentes identificables; organización interna | Límites membranosos; ácidos nucleicos, proteínas, ácidos grasos y otros componentes bioquímicos universales de los sistemas vivos |
| Integridad / operación unitaria | Sistema funcional dinámico e individual | Suma de redes multienzimáticas y sus conexiones con la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas |
| Autolímites | Estructura limitante producida por el propio sistema | Membranas lipoproteicas; paredes celulares Gram negativas, celulósicas o de otro tipo y sus conexiones con el metabolismo primario |
| Automantenimiento / circularidad | Estructura limitante y componentes producidos por el funcionamiento del sistema | Lipogénesis, síntesis de carbohidratos, peptidogénesis, síntesis de ácidos nucleicos (polimerización) y sus interrelaciones |
| Aporte externo de materias primas para los componentes | Aporte externo de H, C, N, O, S, P y otros elementos constituyentes | Enzimas que incorporan CO ₂ , N ₂ , etc. al material celular; ribulosa bisfosfato carboxilasa, succinil caboxilasa, nitrogenasa, etc. |
| | | |

| | | |
|---------------------------|---|---|
| Aporte externo de energía | Aporte de energía luminosa o química: convertible en energía química para enlaces orgánicos | Clorofilas, coenzima F (metanógenos), bacteriorrodopsina, absorción e incorporación de azúcares y de otros compuestos orgánicos en el sistema |
|---------------------------|---|---|

Gaia viene a reflejar cierta capacidad autopoietica, pues se observa que los sedimentos de la superficie y la troposfera de nuestro planeta están regulados de manera activa por la biota (el conjunto de todos los organismos vivos) en relación a la composición química de los elementos reactivos, la acidez, el estado de oxidorreducción y la temperatura. Por todo ello, la microbióloga afirma que “Gaia se define como el gran sistema con capacidad de automantenimiento y de autoproducción que se extiende, con un grosor de unos 20 kilómetros, por la superficie de la Tierra” (Margulis 2003, p. 124). Su automantenimiento es un proceso de autorregulación homeorrética a partir de variables en movimiento no fijadas (Margulis 2003, pp. 124-125 y pp. 261-263). Una de las consecuencias detectadas más claramente de esta capacidad autopoietica de la Tierra o Gaia es la composición atmosférica de nuestro planeta, que difiere de otros planetas inertes vecinos como Marte y Venus:

La biosfera entera es autopoietica en el sentido de que se mantiene a sí misma. Uno de sus “órganos” vitales, la atmósfera, se cuida y nutre. La atmósfera terrestre, con aproximadamente una quinta parte de oxígeno, difiere radicalmente de las de Marte y Venus. En las atmósferas de estos vecinos planetarios nueve de cada diez partes son dióxido de carbono; en la atmósfera de la Tierra el dióxido de carbono representa sólo tres partes de cada diez mil. Si en la biosfera terrestre no hubiera consumidores de dióxido de carbono (plantas verdes, algas, bacterias fotosintéticas y productoras de metano, entre otras formas de vida), hace mucho tiempo que nuestra atmósfera habría alcanzado un equilibrio químico en el que abundaría este gas. Y virtualmente todas las moléculas capaces de reaccionar con otras lo habrían hecho ya. En vez de eso, las actividades combinadas de la superficie viva autopoietica han conducido a una atmósfera en la que el oxígeno se ha mantenido a niveles de alrededor del veinte por ciento durante al menos 700 millones de años (Margulis y Sagan 1995, p. 26).

Nuestro planeta muestra una composición atmosférica propia y diferenciada desde el punto de vista autopoietico, en comparación con Venus y Marte, tal y como se observa en la siguiente tabla:

| Comparación de las atmósferas planetarias de Venus, la Tierra y Marte (Margulis 2003, p. 207) | | | |
|---|--------------|---------------|--------------|
| | Venus | Tierra | Marte |
| Dióxido de carbono, CO ₂ (%) | 98 | 0,03 | 95 |
| Nitrógeno, N ₂ (%) | 1,7 (ve) | 79 | 2,7 (vi) |
| Oxígeno, O ₂ (%) | Trazas (ve) | 21 | 0,13 (vi) |
| Metano, CH ₄ (%) | 0 | 0,0000015 | 0 |
| Agua, H ₂ O (m*) | 0,003 | 3000 | 0,00001 |
| Presión (atm) | 90 | 1 | 0,0064 |
| Temperatura (K, °C) | 750, 477 | 290, 17 | 220, -47 |
| * Profundidad del agua en metros en el planeta si todo el vapor de agua de la atmósfera se condensase. ve = detectado por <i>Venera</i> , vi = detectado por <i>Viking</i> | | | |

La atmósfera de la Tierra actual presenta una anomalía respecto a nuestros planetas vecinos, pues está provista de un gran exceso de oxígeno atmosférico y una cantidad menor de CO₂. Aproximadamente un quinto de la atmósfera de la Tierra es oxígeno (O₂). Combinado con el hidrógeno (H₂) o con gases que contienen hidrógeno (CH₄, H₂S, NH₃), el oxígeno causa explosiones e incendios. Las reacciones que liberan energía transforman los gases reactivos en sus subproductos “gastados” o menos reactivos. Los gases reactivos como el hidrógeno (H₂), el metano (CH₄), el amoníaco (NH₃), el yoduro de metilo (CH₃I), el cloruro de metilo (CH₃Cl) y varios gases de azufre son detectables en la atmósfera de la Tierra porque son creados continuamente por la vida productora de residuos más rápido de lo que pueden reaccionar (Margulis 2002, pp. 142-144). Estas peculiaridades atmosféricas son propias de la Tierra, no de Venus, ni de Marte, cuyas atmósferas presentan mayores concentraciones de “gases gastados” (CO, CO₂, N₂), que ya no

reaccionan unos con otros porque ya lo han hecho. En consecuencia, no se puede explicar la composición de la atmósfera de nuestro planeta -en comparación con Venus y Marte- si no se apela al papel activo y reactivo de los organismos vivos que la modifican y mantienen constantemente.

Estos datos sobre la diferencia en la composición atmosférica de la Tierra posibilitaron realmente la formulación de la hipótesis de Gaia. Desde su primera obra (véase Lovelock 1985, pp. 81-101), Lovelock propuso que todo el sistema aéreo planetario era “metaestable”, es decir, estable en su inestabilidad reactiva. La persistencia de la reactividad química es consecuencia de las acciones combinadas de los seres vivos. La superficie planetaria entera -no sólo los cuerpos vivientes sino también la atmósfera - a la que usualmente consideramos un trasfondo inerte- está tan lejos del equilibrio químico que se puede considerar al modo de un gran sistema cibernético autopoiético que se recicla paulatinamente. Eso lo sabía muy bien Lovelock desde mediados de los años sesenta, pues no en vano él había esbozado esta idea de la Tierra viviente mientras trabajaba como asesor de la NASA ayudando a encontrar formas de detectar vida en Marte (para un relato autobiográfico de su trayectoria profesional, es ineludible leer Lovelock 2005).

En resumen, intentando sintetizar la mayor parte de la contribución de Lovelock y Margulis, se podría afirmar que Gaia ha sido una hipótesis heurística de investigación, que con el tiempo ha generado resultados científicos valiosos, cuya formulación ha requerido elementos meta-científicos o meta-físicos, que se pueden detectar tanto en los escritos de Lovelock como en los de Margulis, al oscilar a veces entre afirmaciones antropocéntricas y otras contrarias. En general, el mayor valor heurístico ha sido postular que la Tierra funciona como un sistema autopoiético autorregulado en su conjunto, es decir, proponer un nuevo entendimiento de la arquitectura ontológica de nuestro planeta -al describir qué tipos de seres y objetos lo componen y cómo interaccionan en su globalidad-, aunque para ello hayan recurrido en ocasiones a presupuestos metafísicos, tal y como la propia Margulis lo ha reconocido de manera muy sincera y honesta:

Gaia es una perspectiva científica de la vida en la Tierra, que representa una nueva visión del mundo biológico. En términos filosóficos, una visión tal es más aristotélica que platónica. Se corresponde con la Tierra real, no con una abstracción ideal, aunque presenta algunas connotaciones metafísicas. Esta

nueva visión del mundo biológico abarca la lógica circular de la vida y de los sistemas de ingeniería, esquivando la herencia greco-occidental de los silogismos finales.

Gaia es una teoría de la atmósfera y de los sedimentos de la superficie del planeta Tierra considerados como un todo. En su forma más general, Gaia sostiene que la regulación de la temperatura y la composición de la atmósfera terrestre están controladas activamente por la vida en el planeta, es decir, la biota. Esa regulación de la superficie terrestre por parte de la biota y para la biota tiene lugar ininterrumpidamente desde la aparición de la vida (Margulis 2003, p. 257).

Este programa ontológico sobre el funcionamiento de nuestros sistemas planetarios, inspirado en una metafísica de corte aristotélico, ha conseguido triunfar parcialmente en la comunidad científica, pero sólo después de depurar parte de sus elementos más polémicos y, sobre todo, después de que el propio Lovelock reconociera algunos excesos iniciales. Así se ha pasado del programa metafísico de Gaia al paradigma del Sistema Tierra, según se va a explicar en la siguiente sección de este artículo.

El paradigma de la Ciencia de la Sostenibilidad y el Sistema Tierra

Siguiendo al propio Lovelock, se puede sostener que la teoría Gaia ha sido admitida indirectamente en una rama del paradigma emergente de la denominada “ciencia de la sostenibilidad” (“*Sustainability Science*”), en concreto, por la “ciencia del sistema Tierra” (“*Earth System Science*”). Eso ocurrió en el año 2001, cuando delegados de más de 100 países que participan en los cuatro principales programas de investigación internacional sobre el cambio ambiental global hicieron suya la “Declaración de Ámsterdam”, que estableció formalmente la “Asociación de la Ciencia del Sistema Tierra” desde las bases para una segunda revolución copernicana (Clark, Crutzen y Schellnhuber 2004). Las comunidades científicas de los cuatro programas internacionales sobre el cambio global -International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP), World Climate Research Programme (WCRP) y el programa internacional sobre diversidad biológica denominado DIVERSITAS- reconocieron en dicha declaración que, además de la amenaza del significativo cambio climático, hay una creciente preocupación por la cada vez mayor modificación humana del resto de aspectos del medio ambiente

global y las consiguientes consecuencias para el bienestar humano. Los bienes y servicios básicos ofrecidos por el sistema de mantenimiento de la vida planetaria, tales como los alimentos, el agua, el aire limpio y un entorno propicio para la salud humana, cada vez están siendo más afectados por el cambio global. Aquella reunión y su consiguiente declaración, hicieron que Lovelock se viera reconocido como inspirador de este nuevo paradigma de una ciencia global para el estudio de nuestro planeta. Lovelock lo admite en las siguientes palabras:

Entonces, al menos en Europa, se empezó a romper el hielo y, en una conferencia en Ámsterdam en 2001 -en la que estaban representadas las cuatro grandes organizaciones que se ocupan del cambio climático global-, más de mil delegados firmaron una declaración que tenía como primera afirmación importante la siguiente: «La Tierra se comporta como un sistema único y autorregulado, formado por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos».

Estas palabras supusieron una abrupta ruptura con la sólida ciencia convencional previa, cuyos biólogos sostenían que los organismos se adaptan a su entorno, pero no lo cambian, y cuyos científicos dedicados a la Tierra creían que las fuerzas geológicas bastaban para explicar la evolución de la atmósfera (Lovelock 2007, pp. 50-51).

Efectivamente, la Declaración de Ámsterdam supuso un cambio de perspectiva en el establecimiento de una ciencia de la sostenibilidad global para nuestro planeta. La declaración admitía que las investigaciones llevadas a cabo durante la última década, bajo los auspicios de los cuatro programas para hacer frente a estas preocupaciones, habían demostrado un consenso en torno a cinco puntos que incidían en el estudio de la Tierra en su conjunto (Moore III, Underdal, Lemke y Loreau 2002, pp. 207-208):

1- *La Tierra se comporta como un sistema único y autorregulado, formado por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos.* Las interacciones y retroalimentaciones entre las partes componentes son complejas y presentan una variabilidad temporal y espacial a nivel multi-escala. La comprensión de la dinámica natural del Sistema Tierra ha avanzado notablemente en los años recientes y brinda una profunda base para evaluar los efectos y las consecuencias del cambio impulsado por el ser humano.

2- *Las actividades humanas están influyendo significativamente en el ambiente de la Tierra de numerosas maneras, además de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático.* Los cambios antropogénicos en la superficie, los océanos, las costas y la atmósfera de la Tierra, así como en la diversidad biológica, el ciclo del agua y los ciclos bioquímicos, son claramente identificables, más allá de la variabilidad natural. Son equiparables a algunas de las grandes fuerzas de la Naturaleza en su extensión e impacto. Muchos de esos cambios se están acelerando. El cambio global es real y se está produciendo *ahora*.

3- *El cambio global no puede ser entendido en términos de un simple paradigma de causa-efecto.* Los cambios impulsados por el ser humano causan efectos múltiples en cascada que recorren el Sistema Tierra por vías complejas. Estos efectos interactúan unos con otros, en cambios a escalas locales y regionales, de acuerdo con patrones multidimensionales que son difíciles de comprender y aún más difíciles de predecir. Las sorpresas abundan en este campo.

4- *La dinámica del Sistema Tierra se caracteriza por umbrales críticos y cambios abruptos. Las actividades humanas podrían desencadenar inadvertidamente tales cambios, con severas consecuencias para el ambiente y los habitantes de la Tierra.* El Sistema Tierra ha funcionado en diferentes estados a lo largo del último medio millón de años, con transiciones abruptas (una década, o menos) entre dichos estados. Las actividades humanas tienen el potencial de modificar el Sistema Tierra hacia modos de operar alternativos, que podrían resultar irreversibles y menos hospitalarios para el ser humano y otros tipos de vida. La probabilidad de un cambio abrupto provocado por el ser humano en el ambiente de la Tierra aún debe ser cuantificada pero no puede ser ignorada.

5- *En términos de algunos parámetros ambientales claves, el Sistema Tierra se ha desplazado claramente fuera del rango de la variabilidad natural exhibido por lo menos a lo largo del último medio millón de años.* La *naturaleza* de los cambios que ahora suceden *simultáneamente* en el Sistema Tierra, sus *magnitudes* y *tasas de aceleración* no tienen precedentes. En el presente la Tierra se está comportando en condiciones inéditas.

Sobre esta base de la Declaración de Ámsterdam, los programas internacionales sobre el cambio global pedían a los gobiernos, a las instituciones públicas y privadas y a los pueblos del mundo unanimidad en dos demandas (Moore III, Underdal, Lemke y Loreau 2002, p. 208):

1- *Se necesita urgentemente un marco ético para las estrategias y la administración globales en la gestión del Sistema Tierra.* La acelerada transformación humana del medio de la Tierra no es sostenible. Por tanto, el modo habitual de tratar el Sistema Tierra *no* es una opción. Tiene que ser sustituido -a la mayor brevedad posible- por estrategias deliberadas de buena gestión que sustenten el ambiente de la Tierra, cumpliendo al mismo tiempo con objetivos de desarrollo económico y social.

2- *Se requiere un nuevo sistema de ciencia del medio ambiente global.* Éste ha empezado a evolucionar a partir de enfoques complementarios de los programas internacionales de investigación sobre cambio global y necesita ser fortalecido y un mayor desarrollo. Utilizará fundamentalmente la base disciplinaria, existente y en expansión, de la ciencia del cambio global. Integrará, más allá de las disciplinas, temas de desarrollo y del medio ambiente, así como las ciencias naturales y sociales. Colaborará más allá de las fronteras nacionales sobre la base de una infraestructura compartida y segura. Intensificará esfuerzos para posibilitar la plena implicación de los científicos de los países en desarrollo. Y empleará las fuerzas complementarias de naciones y regiones para construir un eficiente sistema internacional de ciencia ambiental global.

Estos programas sobre cambio global se comprometieron desde entonces a trabajar estrechamente con otros sectores de la sociedad, también a través de todas las naciones y las culturas, para hacer frente al desafío de una Tierra en transformación. Nuevas asociaciones se empezaron a formar entre las instituciones de investigaciones universitarias, industriales y gubernamentales. Intensificaron el diálogo entre la comunidad científica y los encargados de formular políticas a varios niveles. Se hizo entonces manifiesta la necesidad de tomar medidas para formalizar, consolidar y fortalecer las iniciativas que se están desarrollando en este nuevo paradigma. Su objetivo común es desarrollar la base esencial de conocimientos

necesarios para responder con eficacia y rapidez a los grandes desafíos del cambio global.

Tras la Declaración de Ámsterdam se propuso consolidar un programa que evaluara las principales cuestiones metodológicas del paradigma emergente de la “Ciencia del Sistema Tierra” (*Earth System Science*). Para ello se cogió como referencia el programa que propuso en su día el matemático David Hilbert. En 1900, dentro de la Conferencia Mundial de Matemáticas en París, Hilbert lanzó un monumental programa para evaluar los avances de las matemáticas en el siglo XX. Este programa consistió básicamente en una ecléctica lista de 23 problemas que debían ser resueltos por la comunidad científica. De modo similar, la comunidad científica internacional del Sistema Tierra ha elaborado su propio programa hilbertiano (Schellnhuber y Sahagian 2002, p. 21; Clark, Crutzen y Schellnhuber 2004, pp. 8-14; Schellnhuber, Crutzen, Clark y Hunt 2005), con un listado de 23 preguntas cruciales que deben abordarse para la sostenibilidad global. Este programa para la comprensión del Sistema Tierra surgió tras un congreso organizado en 2001 por GAIM (Schellnhuber y Sahagian 2002) -el laboratorio de ideas transdisciplinario del programa internacional IGBP (International Geosphere–Biosphere Programme)-. Su propuesta programática se postula como un campo de estudio e investigación para el siglo XXI, por medio de una lista de 23 preguntas organizadas en cuatro bloques destacados, a saber, cuestiones analíticas, metodológicas, normativas y estratégicas, respectivamente:

A- Cuestiones analíticas:

1. ¿Cuáles son los órganos vitales de la ecosfera desde el punto de vista del funcionamiento y de la evolución?
2. ¿Cuáles son los principales patrones dinámicos, las teleconexiones y los bucles de retroalimentación en la maquinaria planetaria?
3. ¿Cuáles son los elementos críticos (umbrales, cuellos de botella, transiciones) en el Sistema Tierra?
4. ¿Cuáles son las escalas temporales y los regímenes característicos de la variabilidad natural del planeta?
5. ¿Cuáles son los regímenes de las perturbaciones antropogénicas y de las teleperturbaciones que importan desde el nivel del Sistema Tierra?

6. ¿Cuáles son los órganos vitales de la ecosfera y los elementos planetarios críticos que pueden ser transformados por la acción humana?
7. ¿Cuáles son las regiones más vulnerables en los cambios globales?
8. ¿Cómo son procesados los fenómenos extremos y abruptos a través de las interacciones naturaleza-sociedad?

B-Cuestiones operativas:

9. ¿Cuáles son los principios para la construcción de “macroscopios” (*macroscopes*), es decir, representaciones del Sistema Tierra que agreguen detalles sin cesar, manteniendo al mismo tiempo todos los ítems de los órdenes sistémicos?
10. ¿Qué niveles de complejidad y resolución tienen que ser alcanzados en los modelos del Sistema Tierra?
11. ¿Es posible describir el Sistema Tierra como una composición de regiones y órganos débilmente acoplados, y es posible reconstruir la maquinaria planetaria desde estas piezas?
12. ¿Cuál podría ser la estrategia global más eficaz para la generación, transformación e integración de la serie de datos relevantes del Sistema Tierra?
13. ¿Cuáles son las mejores técnicas para analizar y, en la medida de lo posible, predecir eventos irregulares?
14. ¿Cuáles son las metodologías más apropiadas para la integración del conocimiento entre las ciencias naturales y las ciencias sociales?

C- Cuestiones normativas:

15. ¿Cuáles son los principios y criterios generales para distinguir los futuros sostenibles y no-sostenibles?
16. ¿Cuál es la capacidad de carga de la Tierra?
17. ¿Cuáles son los dominios accesibles pero intolerables en el espacio de la co-evolución entre la naturaleza y la humanidad?
18. ¿Qué tipo de la naturaleza quieren las sociedades modernas?
19. ¿Cuáles son los principios de equidad que deberían gobernar la gestión global del medio ambiente?

D- Cuestiones estratégicas:

20. ¿Cuál es la combinación óptima de medidas de adaptación y mitigación para responder al cambio global?
21. ¿Cuál es la óptima descomposición de la superficie del planeta en reservas naturales y áreas gestionadas?
22. ¿Cuáles son las opciones y advertencias ante soluciones tecnológicas como la geoingeniería y la modificación genética?
23. ¿Cuál es la estructura de un sistema eficaz y eficiente para las instituciones ambientales y de desarrollo globales?

Todas estas iniciativas, desde la Declaración de Ámsterdam hasta la formulación del programa hilbertiano de la Ciencia del Sistema Tierra, suponen la consolidación de un paradigma dedicado a la “ciencia de la sostenibilidad” global, así como un reconocimiento indirecto a los esfuerzos de la propuesta de Gaia como un sistema planetario de interacciones conjuntas. Aún y todo, Lovelock reconoce que hay una diferencia de fondo entre su propia teoría y la de los científicos del Sistema Tierra:

La Declaración de Ámsterdam supuso un paso decisivo hacia la adopción de la teoría de Gaia como modelo de trabajo para la Tierra; sin embargo, las divisiones territoriales y algunas dudas que se resistían a disiparse hicieron que los científicos no se atrevieran, como afirma mi teoría, a declarar que el *objetivo* de esa Tierra que se autorregula es mantener la habitabilidad. Esta omisión permite a los científicos ser partidarios de boquilla de la Ciencia del Sistema Tierra, o Gaia, pero al mismo tiempo continuar llevando a cabo de forma atomizada sus modelos e investigaciones (Lovelock 2007, p. 51).

El objetivo de la habitabilidad de la Tierra es una diferencia crucial para buscar una ciencia de la sostenibilidad global y es justo uno de los debates transdisciplinares más apasionantes en la actualidad. Sobre este objetivo tienen que surgir posteriores discusiones científicas, que seguramente deberán idear un nuevo sistema de gestión para la Tierra y un novedoso marco ontológico para diseñar el futuro de nuestro planeta: escalas espaciales y temporales, umbrales críticos y límites, circuitos y sinergias. Pero está claro que tanto los esfuerzos de Lovelock y Margulis desde su teoría Gaia como las recientes propuestas de la Ciencia del Sistema Tierra están conformando un emergente paradigma (en el sentido que usara Kuhn) para plantear un estudio global de las sinergias y los mecanismos de

autorregulación Ellos conforman ya un hito en la historia del surgimiento de la ciencia de la sostenibilidad planetaria.

Referencias

- Clark, William C.; Crutzen, Paul J.; & Schellnhuber, Hans Joachim (2004). "Science for global sustainability. Toward a new paradigm", in Hans Joachim Schellnhuber, Paul J. Crutzen, William C. Clark, Martin Claussen & Hermann Held (eds.), *Earth System Analysis for Sustainability: Report on the 91st Dahlem Workshop*, Cambridge, Mass., & Londres, The Massachusetts Institute of Technology Press & Dahlem University Press, 2004, pp. 1-25.
- Girardon, Jacques (2001). *La historia más bella de las plantas. Las raíces de nuestra vida*. Barcelona: Anagrama.
- Kuhn, Thomas S. (1962). *The Structure of the Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lovelock, James (1985). *Gaia. Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Barcelona: Ediciones Orbis.
- Lovelock, James (1992). *Gaia. Una ciencia para curar el planeta*. Barcelona: Oasis-Integral.
- Lovelock, James (1993). *Las edades de Gaia. Una biografía de nuestro planeta vivo*. Barcelona: Tusquets.
- Lovelock, James (2005): *Homenaje a Gaia. La vida de un científico independiente*. Pamplona: Editorial Laetoli.
- Lovelock, James (2007). *La venganza de la Tierra. La teoría Gaia y el futuro de la humanidad*. Madrid: Planeta.
- Margulis, Lynn (2002). *Planeta simbiótico. Un nuevo punto de vista sobre la evolución*. Madrid: Debate.
- Margulis, Lynn (2003). *Una revolución en la evolución*. Ed. de Juli Peretó. Valencia: Universitat de València.
- Margulis, Lynn y Sagan, Dorion (1995). *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets.

Moore III, Berrien; Underdal, Arild; Lemke, Peter; & Loreau, Michel (2002). "The Amsterdam declaration on global change", in Will Steffen, Jill Jäger, David J. Carson & Clare Bradshaw (eds.), *Challenges of a changing Earth*, Berlín, Springer-Verlag, pp. 207-208.

Schellnhuber Hans Joachim; Crutzen, Paul J.; Clark, William C. & Hunt, Julian (2005). "Earth system analysis for sustainability", *Environment*, 47 (8), pp. 10-25.

Schellnhuber, Hans Joachim, y Sahagian, Dork (2002) "The twenty-three GAIM questions", *Global Change Newsletter*, 49, pp. 20-21.

Citación de este artículo:

Ayestarán, I. (2009). Gaia y la ciencia de la sostenibilidad: del programa ontológico al paradigma científico. *Revista Umbral*, 1, 21-41. Disponible en: