



# Gaia y naturaleza de la ciencia/Gaia y sistemodinámica<sup>1</sup>

Dr. Fernando J. Noriega Castillo  
Dr. Ricardo Morales de Jesús

## A. Gaia y la naturaleza de la ciencia

### Introducción

En este seminario queremos dar a conocer el concepto de Gaia a la luz de su origen y desarrollo histórico, la forma como se inserta, según algunas visiones, en el proceso de creación de conocimiento científico, así como las razones y maneras como su problemática se relaciona con la Sistemodinámica.

En cuanto a su inserción dentro de los procesos de creación del conocimiento científico, esto es, dentro de aspectos de la naturaleza de las ciencias naturales, es oportuno indicar que hacemos el análisis desde perspectivas que han tenido mayor impacto durante el siglo pasado, como las de Karl Popper, Thomas Kuhn, Imre Lakatos y Mario Bunge.

Aunque las perspectivas son mayormente epistemológicas, hay que tomar en cuenta también aportaciones sociológicas e históricas en la búsqueda de respuesta a preguntas como las siguientes:

¿Qué papel jugó la tecnología y la personalidad de su creador en la propuesta de Gaia y su posterior desarrollo?

---

<sup>1</sup> Seminario Pre-Conferencia Internacional Gaia y Cambio climático presentado el día 28 de febrero de 2007 en la Facultad de Estudios Generales Recinto de Río Piedras de la Universidad de Puerto Rico, como parte de los Seminarios Interdisciplinarios ofrecidos el segundo semestre 2006-2007.

¿Cómo se inscribe la concepción de la Tierra como un organismo vivo, o como un sistema de componentes interactuantes, dentro de la creación de conocimiento científico?

¿Siguiendo a Thomas Kuhn, es Gaia ejemplo de una revolución científica?

¿Es Gaia una teoría científica en el sentido que le da Popper y Bunge al término?

¿Responde Gaia a la interpretación que ofrece Lakatos sobre el desarrollo del conocimiento científico?

¿Se inscribe Gaia dentro de la visión acumulativa, la sistémica falsable, la revolucionaria u otra respecto de su desarrollo como conocimiento científico?

#### Nacimiento de Gaia

¿Qué papel jugó la tecnología y la personalidad de su creador en la propuesta de Gaia y su posterior desarrollo?

El aporte individual y social en la creación y aceptación de nuevo conocimiento científico, es ampliamente aceptado por epistemólogos de diferentes escuelas, así como la necesidad de presentar evidencia científica en la corroboración o rechazo de las hipótesis que se presentan en relación al mundo natural. Menos aceptado es, sin embargo, que la creación de conocimiento científico tiene diferencias con la creación del conocimiento tecnológico y que su finalidad, como conocimiento, es distinta. La propuesta Gaia de James Lovelock provee, entre otros aspectos, la oportunidad de examinar dichos procesos dentro de la perspectiva de interpretación de la estructura y desarrollo del conocimiento.

James Lovelock, proponente de Gaia, pacifista y objetor de conciencia por influencia cuáquera, nació en Brixton, South London, en 1919. En la década del 60 era un consultor tecnológico independiente en Inglaterra, cuyo peritaje en las ciencias químicas y la tecnología era relativamente ajena a las corrientes académicas formales de la investigación científica, aunque había formado parte de un equipo de investigación

médica. Era reconocido como perito en la detección química de muestras sumamente pequeñas y como un inventor de instrumentos de medida y detección de dichas muestras (como el instrumento llamado Detector por Captura Electrónica). Su experiencia en estas labores, posibilitó que fuera contratado por la NASA en 1965 para trabajar en proyectos de exploración militar y espacial, especialmente en la construcción de instrumentos detectores de diversas sustancias. En particular se planteaba en ese momento la búsqueda de vida en Marte y cómo diseñar instrumentos que la detectaran. Aunque la solución más directa era enviar un aparato que trajera muestras del planeta, a Lovelock le pareció que era posible resolver el problema desde la Tierra, una vez estuviera claro cuáles rasgos caracterizan a un organismo vivo y cuales de las características observables asociadas a él ofrecerían indicadores seguros de su presencia en ese planeta.

Como tecnólogo químico, Lovelock pensó que la solución al problema estaba en examinar el comportamiento de la atmósfera marciana, lo cual era relativamente fácil desde la Tierra, dado el amplio desarrollo que la espectroscopia tenía desde finales del siglo XIX, lo cual incluía la existencia de aparatos e instrumentos de análisis bastante precisos. De esta cuenta, supo que el gas con mayor presencia en Marte era el bióxido de carbono, en un 95%, que había poco oxígeno y ningún metano, por lo que dicha atmósfera era prácticamente inerte, en cuanto a reacciones químicas. Siguiendo algunas ideas de Erwin Schrodinger (2000), uno de los creadores de la mecánica cuántica, Lovelock concluye que si la atmósfera de un planeta está en equilibrio químico, esto es, sin moléculas que reaccionen entre sí, la vida es imposible, puesto que las reacciones necesitan disponer de energía, de manera que se contrarreste la entropía natural de los cuerpos (Turney, 2003). En cambio, si la atmósfera está en desequilibrio químico, esto ocurre como consecuencia de que hay organismos vivos u otras entidades que absorben algunos gases mientras dejan intactos a otros o, al menos, que hay vida basada en el carbono y

una civilización industrial, como dice Lovelock (2003). De aquí a proponer que la vida en la Tierra tenía una estrecha relación con el comportamiento atmosférico no hubo más que un paso en su proceso de creación.

A diferencia de la atmósfera marciana, la terrestre muestra una marcada inestabilidad con la presencia de sustancias que como el oxígeno son muy reactivas. Sin embargo, aunque en la atmósfera terrestre hay ahora un 21% de oxígeno, que es altamente reactivo, metano e hidrógeno, también muy reactivos, nitrógeno en un 77 % y trazas comparativamente pequeñas de bióxido de carbono y de otros elementos y compuestos, la atmósfera terrestre, a la luz de la evidencia empírica, ha permanecido sin cambios apreciables por los últimos 250 millones de años. En particular, la presencia de oxígeno en la atmósfera en una cantidad que ha variado entre un 15% y un 25% por el lapso de tiempo mencionado, ha sido suficiente como para mantener la vida como la conocemos hoy en día, así como para no precipitar en mayor proporción la ocurrencia de fuegos en toda la superficie terrestre.

Para Lovelock, tanto la estabilidad en la composición química atmosférica como la de la temperatura, a pesar de un aumento de 30% en la energía luminosa proveniente del sol desde la formación de la Tierra, según los estimados estelares de Carl Sagan, tienen que ver con una regulación de nivel planetario. De aquí que dice: “De pronto la imagen de la Tierra como un organismo viviente hábil para regular su temperatura y su clima a un estado estacionario emergió en mi mente” (Turney, 2003). La regulación de la atmósfera por la presencia de vida en la Tierra y la de su temperatura fue entonces el inicio de la propuesta Gaia. El nombre viene del griego para la diosa de la Tierra, según fuera propuesto por el novelista William Golding, vecino de James Lovelock. Sin embargo, la idea de que la Tierra es un organismo viviente en términos científicos dice él que nunca formó parte de su primera propuesta, salvo en sentido metafórico (Lovelock, 2004).

En la primera propuesta de Gaia, considerada como la hipótesis de que la Tierra se comporta como un organismo autorregulable, vemos entonces el papel desempeñado por el conocimiento científico conocido en su momento, tal como el de las leyes termodinámicas y las reacciones químicas; el conocimiento tecnológico de procesos, conocimientos e instrumentación; la planificación a gran escala en términos económicos y de personal capacitado de proyectos tecnológicos, como la exploración espacial; y la aportación creativa de su proponente en la solución de un problema, es decir, la del componente cognoscitivo y psicológico individual.

¿Cuál es la influencia que dentro del desarrollo del concepto de Gaia va a tener la independencia relativa de Lovelock, el respecto de las comunidades científicas en el momento en que presentó su propuesta, así como la investigación científica de algunas de sus ideas Gaia? Esto es lo que abordamos a continuación.

#### Recepción y desarrollo de la hipótesis Gaia

Desde la primera presentación de Lovelock sobre Gaia, como un sistema autorregulado (en una reunión de la American Astronautical Society en 1968), su propuesta no tuvo acogida entre los científicos aunque sí su idea de que el contenido químico atmosférico posibilitaba el estudio de vida en los planetas. Para esta época empezaban a desarrollarse estudios interdisciplinarios, como los ambientales y la astrobiología. Sin embargo, la mayor parte de la ciencia era fuertemente disciplinaria y, desde el punto de vista de la investigación y desarrollo, reduccionista en su mayor parte, de lo cual se queja Lovelock (2004). Las principales objeciones de la propuesta Gaia vinieron de los biólogos evolucionistas quienes refutaron pronto la idea de pensar a Tierra como un organismo vivo, puesto que no hay evidencia empírica de que los organismos evolucionen a escala global por selección natural de manera que se genere su autorregulación, sino más bien, la unidad de selección evolutiva son los organismos, no la biósfera. Sin embargo, según

él, lo más importante de su propuesta no era considerar a la Tierra como un organismo vivo en sentido biológico, sino considerarlo como un sistema autorregulable y, por lo tanto, con influencias recíprocas entre sus componentes físicos, químicos y biológicos. El nuevo problema que se le planteó fue entonces buscar los mecanismos de las influencias recíprocas entre ellos.

Debe tomarse en cuenta, que ya en 1925, Ludwig Bertalanffy, había mostrado la importancia de examinar desde un punto de vista global, esto es sistémico, a los fenómenos biológicos (Bertalanffy, 1972). Esta propuesta se transformará con el paso del tiempo en la muy importante teoría de sistemas, de aplicación muy amplia en ciencia, matemática y tecnología, por lo que la idea de considerar a la tierra como un gran ecosistema empieza a cobrar fuerza en la década del 70. Además, el desarrollo de la cibernética, en términos de modelos y recursos, que se iniciaba a nivel de instituciones en la década del 60, proveyó de nuevos medios de análisis de los fenómenos biológicos. Aunque en la comunidad científica la idea de que la vida regulaba a todo el planeta fue recibida con escepticismo, actitud propia de la comunidad científica, a la luz del “ethos de la ciencia” del sociólogo Robert K. Merton (1943), no fue así en las organizaciones que promovían de manera cada vez más comprometida la conservación ambiental, entre ellas los partidos políticos, luego llamados “verdes” de Europa y las personas que, como consecuencia de los movimientos sociales de protesta de los años 60, consideraban a la ciencia y su estrecha aliada, la tecnología, como las causantes de los males terrestres. Desde este punto de vista, Gaia, empezó a transformarse en lo que podemos llamar una mitología de la modernidad.

Ante las críticas científicas recibidas, Lovelock, de manera persistente continuó desarrollando el concepto, mientras algunos científicos empezaban a colaborar con él o a hacer estudios guiados por las ideas contenidas en la hipótesis Gaia. Este fue el caso de la estrecha y productiva colaboración de él, desde 1971, con la bioquímica Lynn Margulis,

introduciendo en la hipótesis Gaia la importante idea de que los ecosistemas bacteriales juegan un papel muy importante en la infraestructura de la Tierra, lo que los lleva a ambos a proponer que la Tierra ha sido y sigue siendo manejada por su ecosistema bacterial. Margulis publicó en 1998, *Symbiotic Planet: A New Look in Evolution* (New York: Basic Books) donde plantea nuevos retos a algunas de las interpretaciones de la teoría de la evolución.

Ante los resultados científicos que van surgiendo, según Turney (2003), Lovelock modifica su propuesta original diciendo que "(Gaia) tiene la capacidad de regular la temperatura y la composición de la superficie terrestre y de mantenerla confortable para los organismos vivos", es decir, la homeostasis exhibida por los organismos vivos él la generaliza a nivel terrestre. Aunque esta es una hipótesis viable, el problema es que no había la descripción de un mecanismo que dijera claramente cómo es que el componente biótico tiene la capacidad de regular la temperatura y de mantenerla confortable para los organismos vivos en toda la Tierra.

En búsqueda de tales mecanismos, Lovelock reconoce las aportaciones de Alfred Lotka, quien en 1925, había especulado que era más fácil modelar la evolución de los organismos y de su ambiente natural "acoplándolos como una sola entidad antes que separadamente" (Lovelock, 2003, p. 769), por lo que recurre a la cibernética creando un modelo sumamente simple llamado "Daisyworld": el Mundo de las Margaritas. En condiciones muy simples, la existencia de margaritas, en dos variedades, blancas y negras, que captan de diferente manera la energía solar, produce a la larga un efecto estabilizador, conducente al confort. Como dice Turney (2003, p. 87) "...cuando la conducta (de las margaritas) es modelada usando ecuaciones bien establecidas en la biología poblacional, ellas producen un efecto homeostático." El Modelo de las Margaritas, del cual dice Lovelock (2003, p. 769), que aunque es darwiniano debe tomar en cuenta que "la evolución de los organismos y la evolución de la temperatura proceden como un

solo proceso acoplado". Este modelo sirvió como paradigma para el desarrollo de modelos mejorados, como los que propuso él en conjunto con uno de sus principales seguidores Timothy Lenton (Lenton y Lovelock, 2001). Cuando lo propuso, sin embargo, él insistía (Turney, 2003, p. 89) que "si el modelo es válido 'setenta y cinco años de ciencia neodarwinista necesitará ser reescrita'". Lovelock reconoció, además, que Gaia carecía de mecanismos de control, por lo que tanto él como otros científicos se dan a la tarea de buscarlos mediante evidencia empírica. De esta cuenta, de 1971 a 1986, tanto él como otros científicos, mayormente geoquímicos, propusieron que el desbalance de los nutritivos azufre y yodo, entre la superficie terráquea y la del mar, se debía a la presencia abundante de los compuestos de yoduro de metilo y sulfuro de dimetilo en la superficie marina, especialmente en el Océano Atlántico. El cálculo de sus flujos mostró que estos gases, de origen biológico, eran los principales transportadores en el ciclo del azufre y el yodo. Luego fue sugerido que la descomposición natural de las rocas de silicato de calcio podría regular el dióxido de carbono en la atmósfera y también el clima. En 1986, él y otros científicos descubrieron que el sulfato de dimetilo se oxidaba en la atmósfera para formar núcleos de condensación y, por lo tanto, nubes cuyos contenidos volvían a la superficie terrestre. Estos estudios, lo llevaron a concluir (Lovelock, 2003) que éste podría ser el mecanismo regulatorio que estaba buscando para Gaia, esto es, entre la realimentación climática y el crecimiento de las algas.

A finales de 1980, Lovelock dice tener "suficiente evidencia empírica, modelos y mecanismos como para justificar una teoría Gaia provisional ... los organismos y su ambiente material evolucionan como un solo sistema acoplado, del cual emerge una autorregulación sostenida de clima y química en un estado habitable para lo que sea la biota presente" (Lovelock, 2003, p. 769). En cierto momento, Lovelock también consideró a la tierra como un sistema geofisiológico (incluyendo a sus males como organismo enfermo), quizás como consecuencia de la época en la que trabajó en un grupo de investigación



médica en Inglaterra. En esencia, la hipótesis geofisiológica postuló una homeostasis de las cantidades ambientales debida a la biota (Petersen, 2004)

Sin embargo, los estudios de Caldeira, citado por Volk (2004), mostraron que el costo metabólico del fitoplancton para producir la molécula precursora del sulfato de dimetilo sobrepasa por mucho los beneficios climáticos derivados de la formación de nubes proveedoras de nutrientes y su consecuente lluvia. Por lo tanto, el fitoplancton sintetiza el precursor del compuesto en beneficio de su propio crecimiento y reproducción, no por efectos derivados de la atmósfera.

Para Volk, uno de los principales objetores de la ahora teoría Gaia, no hay pruebas concluyentes de que haya regulación climática y de temperatura debida sólo a la biota terrestre y que los cambios de temperatura, a lo largo de la existencia de la Tierra se han debido también a otros factores. Sus cálculos, con base en datos disponibles, muestran que partiendo de una temperatura superficial de 66° C, hace 4000 millones de años, la Tierra ha tenido un aumento de 6° C debido al 30 % de aumento por calentamiento solar, una disminución de 20° C por el crecimiento de los continentes y la disminución de la actividad volcánica y 35° por la presencia de la vida, lo cual da como resultado 15° C que es la temperatura media actual de la tierra. Para una Tierra abiótica, su cálculo es de 50° C, límite de sobrevivencia de las formas eucarióticas de vida en la Tierra. Para este científico, la Tierra es más bien, un mundo de desperdicios: “Lo que veo (dice) es que la vida genera subproductos y efectos colaterales que llevan al entorno ambiental a varios estados químicos. Todos los organismos, asociados al depósito de desperdicios que es la biósfera, deben adaptarse a estos estados o perecer” (Volk, 2004, p. 32). Tales desperdicios, sin embargo, son aprovechados por los organismos vivos de diferentes maneras, así, el bióxido de carbono generado por los animales es aprovechado por las plantas, quienes a su vez generan como subproducto el oxígeno que es aprovechado por los animales.

Más recientemente, en 1998, Lynn Margulis propondrá que “Gaia es la serie de sistemas interactuantes que componen un ecosistema enorme y único en la superficie terrestre” (Turney, 2003, p. 112).

Para Timothy Lenton (2004, p. 17), Gaia es una teoría que contiene los siguientes principios fundamentales:

- La vida afecta a su ambiente: Todos los organismos alteran su ambiente tomando energía libre y excretando productos de desecho de alta entropía para mantener una baja entropía interna. (Basada en la propuesta de Schrodinger de 1944).
- Crecimiento (incluyendo reproducción): Los organismos crecen y se multiplican, potencialmente de forma exponencial.
- El ambiente restringe a la vida: Para cada variable ambiental hay un nivel o rango en el cual el crecimiento de un organismo particular se maximiza y hay condiciones bajo las cuales el crecimiento es imposible.
- Selección natural: Una vez un planeta contiene diferentes tipos de vida (fenotipos) creciendo en un ambiente de recursos finitos, los tipos de vida que dejan más descendientes vienen a dominar a su ambiente.

En pocas palabras, para Lenton, Gaia debe entenderse como “una especie de sistema termodinámico abierto, de escala planetaria, con vida abundante soportada por un flujo de energía libre de una estrella cercana”. Sin embargo, para este autor, los límites en los cuales la teoría aplica corresponden a la biósfera y la atmósfera, que son las “capas” terrestres donde la vida es abundante, mientras que la influencia de ellas sobre las capas internas terrestres y hacia la estrella cercana, el sol, no deben considerarse.

Si se considera a la Tierra como un sistema termodinámico abierto, el problema se complica desde el punto de vista científico, puesto que si bien es cierto que es posible describir y explicar sin mayor dificultad el comportamiento de un sistema termodinámico cerrado, a la luz de la teoría termodinámica clásica de 1931, de Lars Onsager (Schneider,

2004), y de la formulación completa de la Escuela de Bruselas de mediados del siglo pasado, en los sistemas desequilibrados, esto es, en los abiertos, hay flujos de energía y materiales, reacciones químicas cíclicas y otros sistemas complejos, entre los cuales está la propia vida. Es decir, al considerar a Gaia como un sistema termodinámico abierto, la complejidad priva sobre la relativamente simple linealidad y los sistemas caóticos sobre los deterministas.

### Gaia y la naturaleza de la ciencia

Como pudimos darnos cuenta por la evolución de Gaia, ésta pasó en manos de su proponente de una hipótesis a una posible teoría en sentido científico, con sus mecanismos explicativos. Notamos, sin embargo, que varios de los cambios que él realizó fueron debidos al surgimiento de nuevos datos y aplicaciones de conocimiento usualmente aceptados en química, geoquímica y biología, entre otras ciencias. El proceso muestra que el contenido de Gaia, en su desarrollo, tiene varias hipótesis ad-hoc, lo cual, a la luz de la historia de las ciencias físicas, hace de ella una teoría incompleta como sistema conceptual (como sucedió también en el caso copernicano, con el uso de los llamados epiciclos). Por otra parte, sin embargo, es ejemplo de la manera como Popper (1963) propuso que se desarrolla el conocimiento científico: mediante conjeturas y refutaciones. Obviamente las refutaciones vienen no sólo de las aportaciones del conocimiento científico aceptado, como la teoría de la evolución aplicada a casos particulares, sino de la evidencia empírica, por ejemplo en los ciclos del carbono, azufre y fósforo, entre otras.

La pretensión original de Lovelock, referente a que había que reescribir el neodarwinismo, es un ejemplo de los muchos en sus trabajos que pueden considerarse como creación de nuevas propuestas que retan al conocimiento científico establecido, esto es, lo que a la larga, según Thomas Kuhn (1962), podría precipitar una crisis en la forma de describir y

explicar diversos fenómenos naturales, en este caso en las ciencias terrestres. Sin embargo, notamos que (igual que en el caso de la llamada Revolución Copernicana), no hubo fenómenos inexplicables que precipitaran una crisis, sino más bien la necesidad de explicar cambios a nivel terrestre de forma integrada y globalizada, esto es, sistémica. Tampoco se observa que haya una nueva terminología que permita sostener que hay una nueva ciencia inconmensurable, es decir, incompatible con la ciencia anterior. En este sentido consideramos que Gaia no es una revolución científica en el sentido kuhniano del término, sino más bien una reescritura de conocimiento científico guiada por nuevas ideas dentro de una perspectiva sistémica.

A lo largo de los trabajos de investigación sobre Gaia sí notamos que hay actualmente una corriente que podemos llamar lo que Kuhn llama ciencia normal, la cual reconoce implícitamente la importancia de Gaia y de sus principales hipótesis y que continúa desarrollándose mediante aportaciones de nuevas investigaciones, situando a quienes las hacen en una comunidad de practicantes con su matriz disciplinaria (lo que llamó Kuhn (1989) inicialmente paradigma, formada por creencias, métodos, prácticas, valores y resultados compartidos).

Si tomamos en cuenta, la propuesta de Gaia como teoría, según Lenton, notaremos que salvo por el primer principio hipotético que es de aplicación en cualquier astro cercano a una estrella del tipo nuestro, los siguientes principios son, más bien, generalizaciones que surgen de resultados conocidos a partir de la teoría de la evolución, avalados por bastante evidencia empírica. Es decir, aunque Gaia es un sistema de hipótesis que posibilita el logro deductivo de proposiciones de contenido observacional, en el sentido popperiano del término, es una teoría de capacidad explicativa limitada en el sentido de que sólo aplica a la Tierra con sus excepcionales cualidades en cuanto a temperatura, composición química, procesos de meteorización y salinidad marina que al momento, la hacen única en cuanto astro conocido. Faltaría ver si como teoría posee la importante

capacidad predictiva, propia de las teorías más exitosas de las Ciencias Naturales, al aplicarlo a un astro real similar a la Tierra, lo que de paso posibilitaría su posible falsación. Titán, una de las lunas saturnianas, exhibe características similares a la atmósfera terrestre previa al surgimiento del oxígeno, posibilitando la búsqueda de formas primitivas de vida que no requirieron de este elemento para su sobrevivencia.

Es importante anotar, sin embargo, que aún con las imperfecciones de su desarrollo, las ideas contenidas en la propuesta abrieron varios caminos de investigación nueva, aunque fuera meramente para refutar las afirmaciones de Lovelock. Sus ideas centrales, en términos de la interrelación entre los componentes biótico y abiótico de la Tierra y la existencia de mecanismos de control en cuanto al aumento o disminución de flujos de energía internos, constituyen un núcleo teórico que es la semilla de lo que Imre Lakatos llama Programa de Investigación (Lakatos, 1970). Los programas de investigación han sido muy exitosos desde el punto de vista del desarrollo científico, como la propuesta teórica de Dalton respecto de la estructura atómica de la materia, la de Newton con sus conceptos de fuerza y partícula aplicables universalmente y la de la evolución, con sus ideas germinales de selección y especiación. En este sentido, el núcleo referente a la mutua interacción del componente biótico con las condiciones ambientales subsiste, así como el de los mecanismos de control que disminuyen o aumentan los flujos de energía interna. En cuanto sistema termodinámico abierto en los flujos de energía y materia, posibilitadores de la vida en la Tierra, hay también un programa de investigación planteado en términos de complejidad y conductas caóticas de los sistemas.

En conclusión, entendemos que los procesos y resultados relacionados a Gaia, considerada como teoría, no se sitúan meramente en un proceso acumulativo de conocimiento puesto que hay reinterpretaciones de conceptos conocidos, por ejemplo, ahora en un contexto interdisciplinario, y no es una revolución científica puesto que hay ausencia de cambios epistemológicos radicales. Más bien, los procesos y resultados se

ajustan a un proceso dialéctico de desarrollo, puesto que del conocimiento conocido sobre el mundo natural surgen nuevas interpretaciones, las cuales luego de ser sometidas a procesos empíricos de corroboración o falsación dan lugar a conceptos y formas nuevas de explicación y descripción del mundo natural. Los acercamientos a los problemas, como ocurrió en el caso de la mecánica cuántica con el uso del hamiltoniano de la mecánica clásica o en la teoría de la relatividad con el de partículas y ondas, ambas de la mecánica newtoniana, también se hicieron en el caso Gaia también desde conocimiento conocido.

## **B. Gaia y la Sistemodinámica**

¿Cuál es la necesidad o la importancia de utilizar a la Sistemodinámica en la búsqueda de respuesta a las interrogantes que plantea Gaia, desde un punto de vista científico?

En esta parte del seminario presentaremos la metodología de modelaje conocida como sistemodinámica y su aplicación en el estudio de Gaia como sistema. Se presentarán aspectos sobresalientes de la sistemodinámica, tales como tecnología, ciencia y filosofía. Además, se definirán los componentes fundamentales de un modelo genérico. El caso clásico de la Teoría Gaia, el Mundo de las Margaritas, se utilizará para ejemplificar el proceso de modelaje. Se presentará el modelo del Mundo de las Margaritas y se discutirá el caso base y las posibles variaciones al modelo. Se finalizará presentando la posibilidad de un modelo sistemodinámico de la Gaia.

Se busca ofrecer respuesta a preguntas tales como:

¿Qué es la sistemodinámica?

¿Cómo un mundo idealizado habitado sólo por margaritas nos enseña algo sobre Gaia?

¿Por qué el uso de la sistemodinámica para entender Gaia?

### ¿Qué es la sistemodinámica?

La sistemodinámica es una disciplina que permite modelar sistemas complejos con la ayuda de las computadoras para estudiar posibles relaciones entre sus partes internas. La meta es crear un modelo conceptual de un sistema y simular su devenir en el tiempo, estableciendo las relaciones entre sus partes y estructurándolo de forma apropiada en un programado especializado. El principio central de la sistemodinámica puede formularse

así: El mundo real está organizado en sistemas dinámicos que pueden modelarse como conjuntos de niveles y flujos, estructurados en bucles de realimentación que determinan su modo de comportamiento. Se toma como sistema dinámico el conjunto selecto de propiedades o aspectos cambiantes de la cosa en cuestión, específicamente aquellos que la hacen aparecer como una estructura organizada en vez de ser un mero agregado. El sistema es, pues, un aspecto o sector de la realidad que se comporta como un todo en ciertos aspectos, y como tal posee propiedades sistémicas que surgen de la interconexión entre sus partes.

Sobre su origen, se puede decir que la dinámica de sistemas o sistemodinámica es una forma de pensamiento humano asociada a la teoría general de sistemas, propuesta por el biólogo y filósofo Ludwig Von Bertalanffy en su "General Systems Theory" de 1968. Específicamente es un pensamiento de enfoque sistémico propuesto por Jay W. Forrester durante la década de 1950 cuando era profesor de la Escuela Sloan de gerencia del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT).

En efecto, a Forrester se le ocurrió que todo sistema dinámico es análogo a un sistema hidráulico de vasos comunicantes en el que los flujos que comunican los vasos, dependen de sus acumulaciones. Además, destacó las posibilidades de la sistemodinámica como tecnología en la ingeniería general de sistemas, orientada a guiar el diseño e intervención humana sobre ellos, muy especialmente sobre los sistemas sociales. En síntesis, propone modelar un sistema y mejorarlo encontrando los cambios factibles en el modelo que inducen modificaciones deseables y duraderas en el comportamiento del sistema. La aplicación de la sistemodinámica como tecnología incluyó múltiples temas de creciente complejidad. Como consecuencia del programa de investigación, Forrester publicó: "Industrial Dynamics" en 1961; "Urban Dynamics" en 1968; y "World Dynamics" en 1973.

Fue "World Dynamics" el que sirvió de base al trabajo de los sistemodinamicistas Dennis y Donella Meadows quienes construyeron un segundo modelo del mundo junto a un grupo interdisciplinario de más de una docena de especialistas de las ciencias naturales, sociales, ambientales, salubristas y agrícolas. Los resultados y la discusión de varios escenarios para este ejercicio de modelaje del mundo se plasmaron en la obra de Meadows, et al, "Limits to Growth" de 1972 y en el informe técnico "Dynamics of Growth in a Finite World" de 1974. Las proyecciones realizadas para el siglo 21 con este Modelo del Mundo predijeron que el patrón mundial de crecimiento económico, demográfico, de uso de recursos naturales y de contaminación ambiental sería insostenible. También se planteó de forma concreta los límites prácticos al crecimiento de la humanidad para

finales del siglo 20 y se enfatizó la necesidad de un desarrollo sustentable para lograr un futuro social benigno.

En la actualidad, la sistemodinámica ha sido utilizada para modelaje en casi todos los campos del saber científico y se considera como una herramienta útil para el estudio de sistemas sociales, económicos, físicos, químicos, biológicos y ecológicos, entre otros.

En Puerto Rico existe el Instituto de Sistemodinámica dirigido por el profesor Joaquín Medín Molina, docente e investigador en el Departamento de Física en la Universidad de Puerto Rico, en Bayamón. Según Medín, la sistemodinámica debe considerarse bajo un triple estatuto como tecnología de sistemas, como ciencia y como filosofía. Su propuesta es clara, en el sentido de que si queremos modelar sistemas complejos que no entendemos, debemos utilizar un pensamiento sistemodinámico para estudiarlos como problema; y claro está para explorar alternativas que puedan ayudar a mejorar nuestro entendimiento sobre ellos. Más práctico aún, como propone en el sugerente ensayo de la sistemodinámica como convergencia, ésta puede utilizarse como método para integrar la ciencia, la tecnología y las humanidades en la enseñanza, sin subordinar unos saberes a otros en el mapa de la cultura universitaria.

Los artículos de investigación publicados en revistas de pares que han utilizado la sistemodinámica como herramienta son numerosos. También existen grupos internacionales de interés como el “System Dynamics Society”. Los programados comerciales para este tipo de modelaje, como Stella y Vensim, han facilitado mucho el proceso de modelaje permitiendo que un número mayor de investigadores apliquen esta disciplina en sus áreas de estudio.

Por otra parte, si queremos entender realmente la aplicación de la sistemodinámica debemos considerar el proceso de modelado. Para ello presentaremos primero el proceso generalizado y luego su ejemplificación. Tómese modelar como representar esquemáticamente un sistema dinámico, hacerle una caricatura conceptual. La ruta para estructurar un modelo comienza con la selección de un paradigma, como núcleo fundacional de hipótesis generales acerca del devenir del sistema dinámico. Se identifican los componentes del sistema y se reconocen sus interconexiones elementales. Aunque la creación de la estructura del modelo aparenta ser simple, la complejidad se encuentra en las consecuencias dinámicas de las interacciones entre las partes del sistema. Es en la simulación que las computadoras entran en juego para ayudarnos a visualizar las consecuencias de las estructuras que proponemos, es decir, determinan los modos de comportamiento del sistema.



El lenguaje transdisciplinario de la sistemodinámica incluye términos que designan conceptos importantes en el proceso de modelado, tales como: nivel, flujo, tasa, tiempo de residencia, bucle de realimentación, conflictivo y dominante, polaridad de un bucle, propiedad emergente, simulación, sistema dinámico, estructura y frontera del sistema, modelo mental, modelo dinámico, complejidad dinámica y apalancamiento. La estructura de un sistema dinámico se postula como compuesta de niveles en unas reservas y flujos que las intercomunican. Los niveles son las variables de estado que designan las propiedades acumulativas del sistema o acumulaciones. Los flujos modulan la variación de estos niveles en el tiempo, a su vez son influenciados por las acumulaciones en los niveles. Los conectores y convertidores se utilizan para definir las interconexiones entre los niveles y los flujos.

Figura 1. Ejemplo de un diagrama de Forrester, fuente J. Medín Molina.

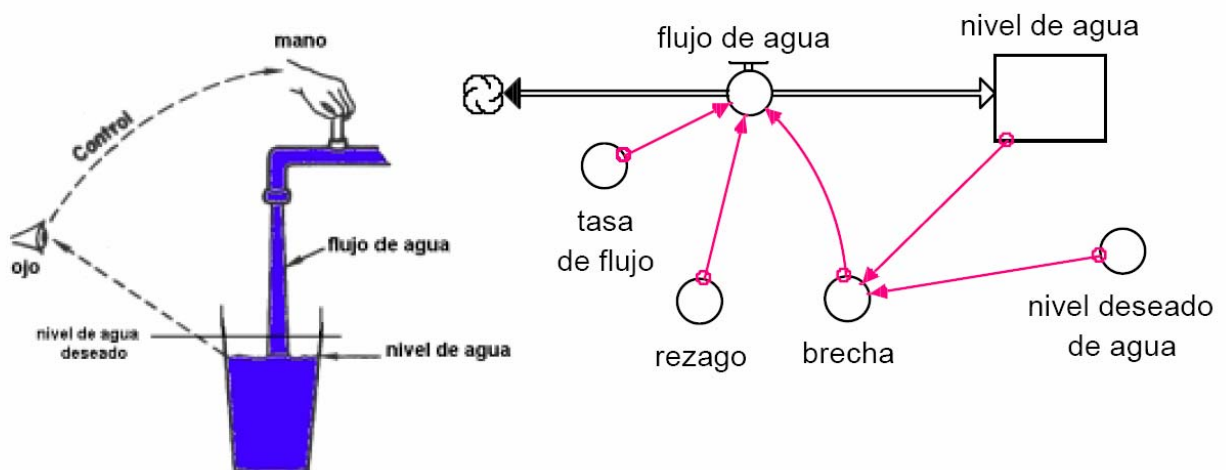


FIGURA 0: Ilustración de los elementos fundamentales del modelado sistemodinámico. A la izquierda se presenta el sistema cuyo mapa conceptual sistemodinámico (diagrama de Forrester) aparece a la derecha del dibujo. El nivel de agua en el vaso es controlado por el flujo de agua hacia el vaso, el que a su vez es regulado por la posición del grifo, que a su vez es ajustada por la persona de acuerdo con la brecha entre el nivel de agua en el vaso y el nivel deseado. El flujo circular de información y materia constituye un bucle de realimentación o cadena circular de causas y efectos.

### ¿Qué nos enseña sobre Gaia un mundo idealizado habitado sólo por margaritas?

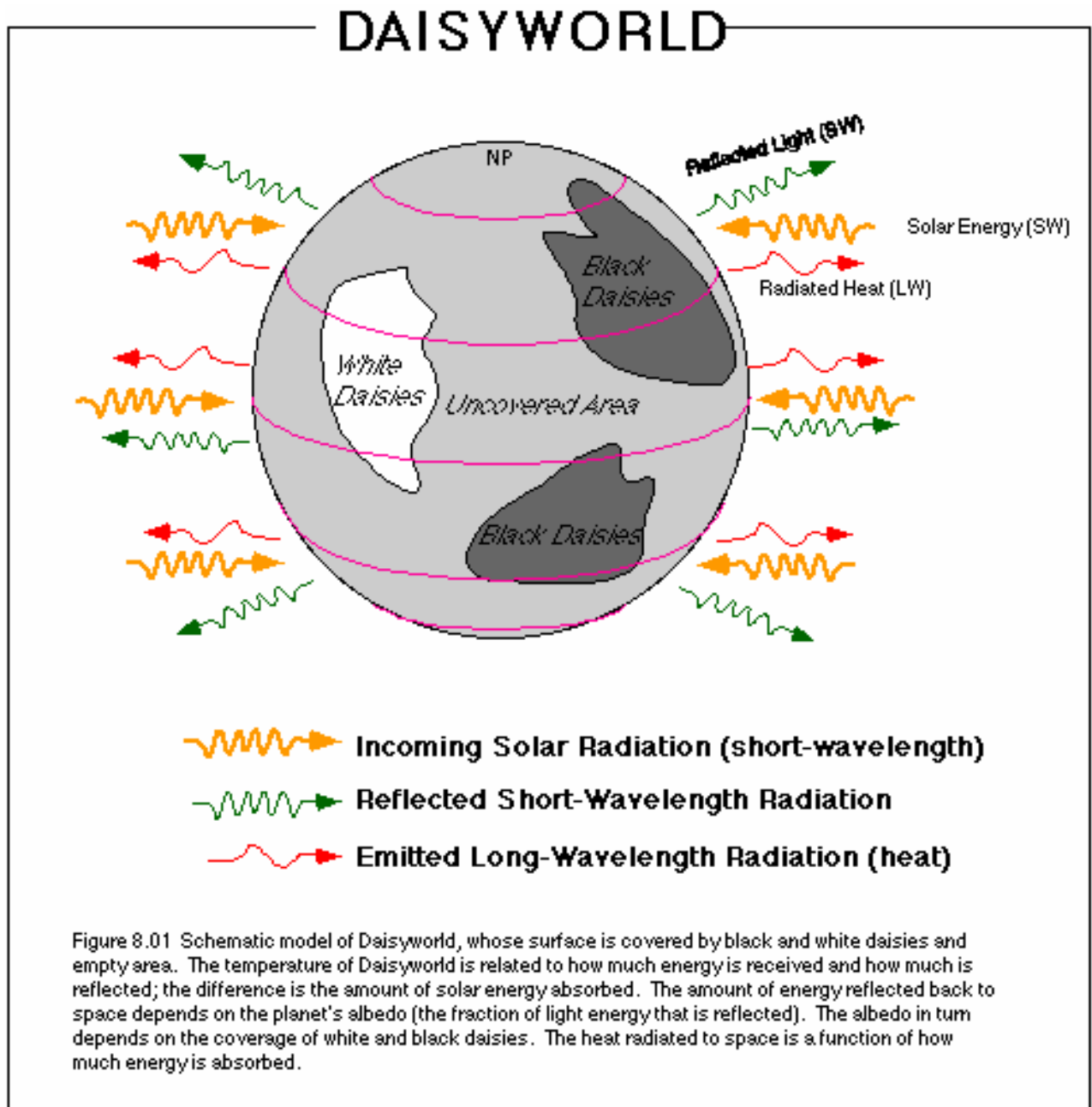
El Mundo de las Margaritas de James Lovelock es un planeta hipotético parecido al nuestro, orbitando una estrella similar a nuestro sol. Como nuestro sol, esa estrella crece a lo largo de la simulación haciéndose progresivamente más brillante según transcurre el tiempo y, por lo tanto, radiando cada vez más energía luminosa. Si tomamos como referente las condiciones de un planeta sin vida, la temperatura de su superficie

aumentaría proporcionalmente con la radiación solar recibida, según la relación de Steffan-Boltzman. Lo sorprendente del Mundo de las Margaritas es que la temperatura de la superficie permanece aproximadamente constante a lo largo de toda la simulación, es decir, hay una auto regulación de su ambiente interno o sea una homeostasis planetaria, relacionando la evolución de las margaritas y la autorregulación de la temperatura.

#### Representación esquemática del Mundo de las Margaritas

El mundo de las margaritas, cuya superficie está cubierta por margaritas negras y blancas y espacio baldíos, se presenta de forma esquemática en la Figura 2. La temperatura de este planeta se relaciona con la cantidad de energía recibida y la cantidad de energía reflejada, siendo la diferencia la cantidad de energía absorbida. La cantidad de energía reflejada al espacio depende a su vez del albedo planetario (la fracción de energía radiante que es reflejada). El albedo dependerá a su vez del área cubierta de margaritas negras y blancas y el calor radiado de la superficie al espacio será función de la energía absorbida.

Figura 2. Representación esquemática del Mundo de las Margaritas. Tomado de "Modeling Daisyworld".



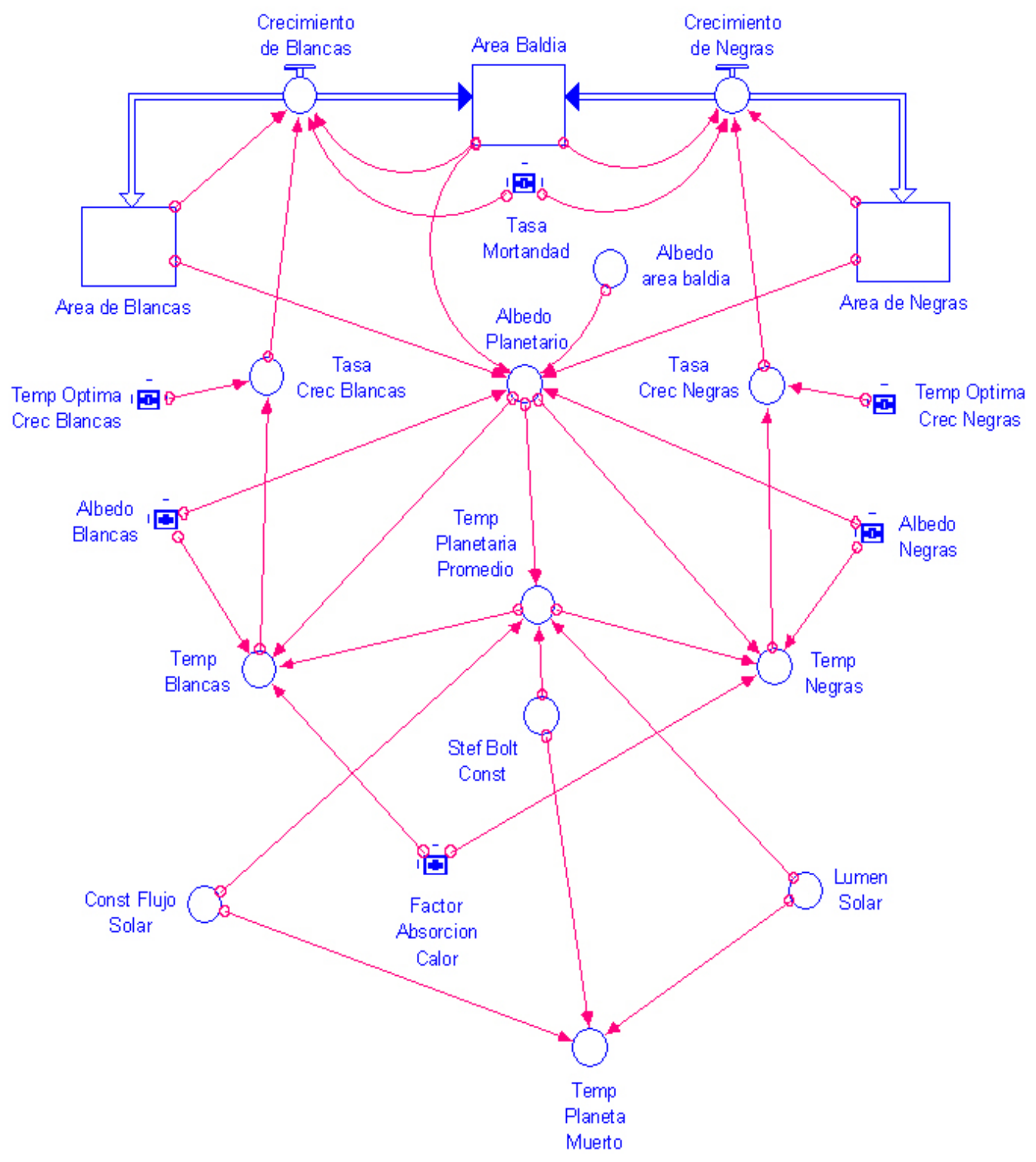
### Construcción del Modelo

Nuestro paradigma en esta simulación es que la biósfera del planeta, que consiste de margaritas negras y margaritas blancas exclusivamente, actúa de alguna forma para moderar la temperatura planetaria en un rango confortable para ellas. Las áreas cubiertas por margaritas negras y blancas y el área baldía representan los niveles del modelo. Los

flujos principales son el crecimiento y la muerte de las poblaciones de margaritas. Asumiremos que ellas influyen la temperatura de la superficie a través del efecto de albedo. Las oscuras reflejan muy poco de la energía luminosa del sol, las claras reflejan la mayor parte de hacia el espacio. La cantidad neta de energía absorbida por la superficie del planeta será función de la cantidad total de radiación recibida menos la cantidad de radiación reflejada. El diagrama de Forrester del Mundo de las Margaritas se muestra adelante en la Figura 3.

El bucle de realimentación positivo, esto es, el autoreforzante, es representado por las margaritas negras. Las margaritas negras reflejan muy poca radiación solar, absorben más radiación y así calientan su entorno, por lo que a mayor área cubierta de margaritas negras mayor será la temperatura global. El bucle de realimentación negativo, autorregulador, es representado por las margaritas blancas. Las margaritas blancas reflejan mejor la radiación y así enfrían su entorno, es decir, a mayor área cubierta de margaritas blancas menor será la temperatura global. En resumen, el área cubierta de margaritas, negras o blancas, afecta el albedo planetario, el cual afecta la temperatura planetaria promedio, la que afecta la temperatura local de las margaritas, lo que afecta la tasa de crecimiento de las margaritas, afectando a su vez su crecimiento y el área cubierta por ellas.

Figura 3. Diagrama de Forrester para el Mundo de las Margaritas. Fuente M. Sanfioenzo y R. Morales-De Jesús, verano 2004.



### Hipótesis fundamentales del Mundo de las Margaritas

Primera. La temperatura planetaria dependerá de la cantidad neta de radiación de onda larga emitida por la superficie, que a su vez depende de la cantidad de radiación de onda corta que llega a la superficie. La temperatura planetaria se calcula utilizando una ecuación clásica de la física, llamada Ley de Stefan-Boltzman [1], la cual se expresa mediante la ecuación:

$$F = e * s * A * T^4 \quad [1]$$

Donde F: flujo de energía de emisión superficial (Joules / seg); e: emisividad del objeto (adimensional); s: constante de Stefan-Boltzman (5.67E-8 (Joules/seg \* m<sup>2</sup> \* K<sup>4</sup>)); A: área superficial del objeto (m<sup>2</sup>); T: temperatura del objeto (grados Kelvin)

Segunda. La energía emitida por la superficie será igual a la energía absorbida por ésta.

Tercera. La energía absorbida por la superficie será igual a la energía recibida del sol menos la reflejada por la superficie.

Cuarta. La energía recibida será igual al flujo de luminosidad solar.

Quinta. La energía reflejada será igual a la energía recibida por el albedo planetario.

Sexta. El factor de crecimiento de las margaritas responde a la ecuación de una parábola.

Séptima. La temperatura local de las zonas pobladas por margaritas actuará como factor regulador del crecimiento.

### Cuadro 1. Parámetros relevantes. Ejemplos de convertidores. Tomado de Modeling Daisyworld".

```

Avg_Planet_Temp = ((Solar_Luminosity*Solar_Flux_Constant*(1-planetary_albedo) /
SB_constant)^.25) -273 {energy balance to calculate temperature in °C}
black_albedo = .25
Black_Growth_fact = 1-.003265*((22.5-Temp_Black_Land)^2) {this is the equation for a
parabola like that shown in Figure 8.03}
death_rate = 0.3
heat_absorp_fact = 20 {this controls how the local temperatures of the daisies differ from
the average planetary temperature}
planetary_albedo = (Uncovered_Area*uncovered_albedo) + (Black_Area*black_albedo) +
(White_Area*white_albedo)
SB_constant = 5.669E-8 {Stefan-Boltzmann constant W/°K^4}
Solar_Flux_Constant = 917 {W/m^2 -- for reference, our Sun cranks out 1370 W/m^2}
Temp_Black_Land = heat_absorp_fact*(planetary_albedo-
black_albedo)+Avg_Planet_Temp
Temp_White_Land = heat_absorp_fact*(planetary_albedo-white_albedo) +
Avg_Planet_Temp
T_Dead_Planet = ((Solar_Luminosity*Solar_Flux_Constant*(1-.5)/SB_constant)^.25)-273
{energy balance to calculate temperature in °C of a planet with no daisies}
uncovered_albedo = .5
white_albedo = .75

```

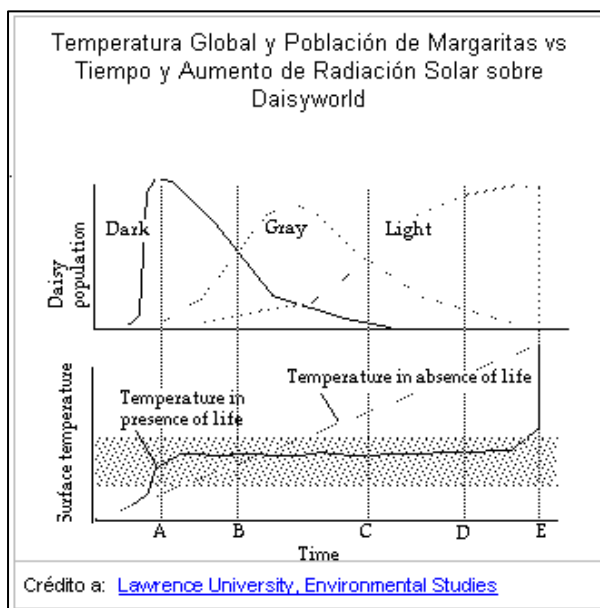
$$\text{White\_Growth\_fact} = 1 - 0.003265 * ((22.5 - \text{Temp\_White\_Land})^2)$$

$$\text{Solar\_Luminosity} = 0.6 + (\text{time} * (1.2/200))$$

Escenario base

El escenario base del modelo, mediante etapas, se muestra a continuación mediante gráficas de población de las margaritas y de la temperatura planetaria. Las etapas se enumeran de A a E.

Figura 5. Escenario base de la simulación. Fuente "Hipótesis de Gaia".



**A:** cuando el sol era relativamente joven, las margaritas oscuras eran la especie dominante porque sus agrupamientos creaban oleadas de calor que favorecían su crecimiento. Rápidamente el planeta se pobló de margaritas oscuras y su efecto fue optimizar la temperatura global para su crecimiento.

**B:** cuando las margaritas oscuras habían establecido una temperatura confortable, las margaritas grises y claras comenzaron a prosperar, dadas las excelentes

condiciones.

**C:** Eventualmente, la radiación solar causó que la temperatura en la superficie aumentara. Excediendo la temperatura máxima tolerable por las margaritas oscuras.

**D:** En ese momento, las margaritas claras comenzaron a convertirse en la especie dominante a causa de oleadas de fresco que favorecían su propagación. A medida que se propagaban, su efecto colectivo era disminuir la temperatura global a un nivel óptimo para su crecimiento. Un planeta muerto tendría una temperatura más arriba del límite posible de vida. De ésta forma, las margaritas claras, sin tener conocimiento del planeta como un todo, actuaban como control de la temperatura global.

**E:** Finalmente, el calor del sol llegó a ser tan grande que ningún tipo de margarita pudo ejercer control y todas murieron.

Un comentario final podría aclarar las implicaciones de los resultados presentados: El Mundo de las Margaritas muestra que la auto-regulación del ambiente global puede emerger de las alteraciones que los organismos hacen a su ambiente local en diversas formas. Otras investigaciones subsiguientes al Mundo de las Margaritas, mostraron que al haber más interacciones ecológicas la autorregulación mejora.

### ¿Por qué el uso de la sistemodinámica para entender Gaia?



No es de extrañarse que la mirada que Lovelock da a la Tierra como sistema surgiera con las primeras imágenes de ésta desde el espacio. Además, como dijimos antes, sus ideas iniciales de Gaia surgen al comparar la atmósfera de la Tierra con la de los planetas vecinos Venus y Marte.

Relata Lovelock, en su autobiografía "Homage to Gaia", en torno al origen de la hipótesis Gaia, que "fue en otoño de 1965 que alcance a ver un destello de Gaia. Una idea maravillosa llegó a mí. La atmósfera de la Tierra es una mezcla inestable de gases, aunque conozco que su composición se ha mantenido constante durante periodos considerables de tiempo. ¿Podría ser que la vida en la Tierra no solo creó la atmósfera, sino que la regula para mantenerla con una composición constante, y en un estado favorable para los organismos?"

Tomando esta idea, un sistemodinamicista diría: ¿Cuáles podrán ser los bucles de realimentación que están actuando a nivel planetario para mantener la atmósfera con una composición constante? Someramente podemos mencionar dos de estos posibles bucles, el bucle reforzante es el efecto de invernadero (margaritas negras) y el bucle estabilizador es la formación de nubes marinas a partir de aerosoles de origen biogénico (margaritas blancas). Para entender más profundamente estos bucles tenemos que estudiar los ciclos biogeoquímicos de los elementos carbono y azufre, tarea que trasciende los alcances de este seminario.

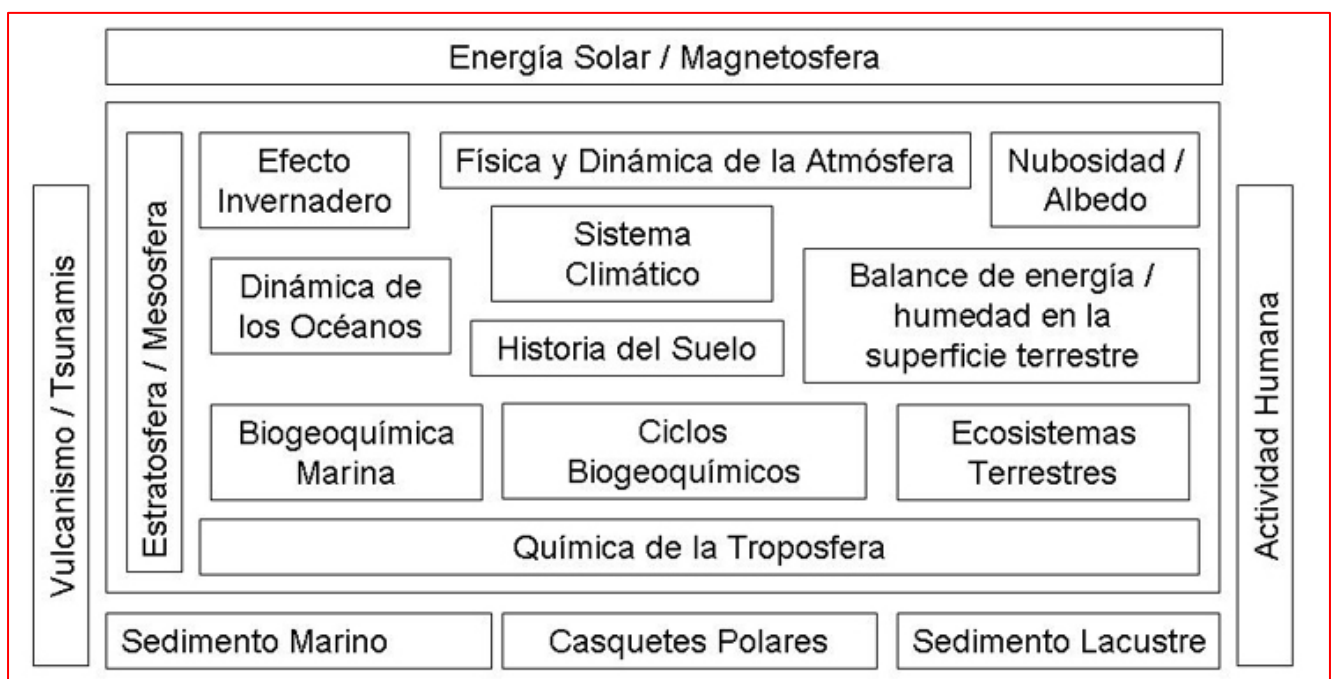
Como sabemos, fue el ingeniero químico James Lovelock y la bioquímica y microbióloga Lynn Margulis quienes reformularon la hipótesis Gaia. Una definición de la misma, del libro "Las edades de Gaia", es: "Gaia no es sinónimo de biósfera, y tampoco es biota, es decir, la colección de todos los organismos vivos. Biota y biósfera son parte de Gaia, así como lo son las rocas, el aire y los océanos y no son necesariamente discernibles por el conocimiento de las especies o de las poblaciones que viven en conjunto. La hipótesis



Gaia afirma que la temperatura, la oxidación, la acidez y ciertos aspectos de las rocas y de las aguas permanecen globalmente constantes y que su homeostasis se mantiene por procesos activos de retroalimentación (feedback) operados automáticamente e inconscientemente por la biota”. Continua relatando Lovelock en “What is Gaia”: “No hay nada inusual en la idea de la vida en la Tierra interacciona con el aire, el océano y las rocas, pero se necesitó una mirada desde afuera para visualizar la posibilidad de que estas interacciones puedan constituir un único sistema vivo y, además, un sistema con la capacidad de mantener la Tierra en un estado favorable para la propia vida en este”.

Actualmente la terminología que se utiliza para denominar los estudios de la Tierra es Ciencias del Sistema Tierra. Las Ciencias del Sistema Tierra estudian las interacciones entre biósfera, geósfera, hidrósfera, criósfera y atmósfera. La sistemodinámica puede guiar el desarrollo de nuevas investigaciones en estas áreas interdisciplinarias. Aunque debemos recordar que sólo podemos modelar aspectos sistémicos de la realidad de Gaia, no la totalidad de las interacciones entre la totalidad de sus componentes. Un posible modelo de la Tierra se presenta en el artículo “Earth’s System Analysis”, Nature 1999, mientras que una simplificación conceptual se incluye en la Figura 6.

Figura 6. Maquinaria del Planeta Tierra simplificada. Fuente “Earth System Analysis”.



Referencias de Gaia y la naturaleza de la ciencia

Bunge, Mario (1980). **La ciencia, su método y su filosofía**. Buenos Aires: Siglo Veintiuno.

Kuhn, Thomas (1975) **La estructura de las revoluciones científicas**. Edición en español de la edición inglesa de 1962. México: Fondo de cultura Económica.

Kuhn, Thomas (1989) **¿Qué son las revoluciones científicas? y otros ensayos**. Reedición de la primera edición de 1987. Barcelona: Paidós.

Lakatos, Imre (1970) Falsification and the Methodology of Scientific Research Programs. In I. Lakatos and A. Musgrave (editors) **Criticism and the Growth of Knowledge**, 91-195. Cambridge: Cambridge University Press.

Laudan, Larry (1990)\_Demistifying Undetermination. En C. Wade (editor) **Scientific Theories**, Vol 14. Minnesota Studies in the Philosophy of Science. Minneapolis: University of Minnesota Press, 267-297.

Lenton, Timothy M. (2004). Clarifying Gaia: Regulation with or without Natural Selection. En **Scientist Debate Gaia**. Schneider, S. H, Miller, J. R, Crist, E. and Boston, P. J (editors), 15-25. USA: Massachussets Institute of Technology.

Lenton, Timothy. M. y Lovelock, James (2001) Daisyworld revisited: quantifying biological effects on planetary self-regulation. **Tellus**, 53B, 288-305.

Lovelock, James (2004). Reflections on Gaia. En **Scientist Debate Gaia**. Schneider, S. H, Miller, J. R, Crist, E. and Boston, P. J (editors), 1-5. USA: Massachussets Institute of Technology.

Lovelock, James (2003). The Living Earth. **Nature**, Vol 426, 18-25, Dec. 2003.

Merton, Robert K. (1942). The Ethos of Science. In R. K. Merton, **On Social Structure and Science**, 267-276.

Petersen, Arthur C. (2004). Models and Geophysiological Hypothesis. En **Scientist Debate Gaia**. Schneider, S. H, Miller, J. R, Crist, E. and Boston, P. J (editors), 1-5. USA: Massachussets Institute of Technology.

Popper, Karl (1963). **Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge**. New York: Harper & Row.

Schödinger, Erwin (2000) **What is Life?** Reimpresión de la publicación de 1944 de Cambridge University Press. London: The Folio Society.

Schneider, Eric D. (2004). Gaia: Toward a Thermodynamics of Life. En **Scientist Debate Gaia**. Schneider, S. H, Miller, J. R, Crist, E. and Boston, P. J (editors), 46-56. USA: Massachussets Institute of Technology.

Turney, Jon (2003). **Lovelock y Gaia. Signs of Life**. New York: Columbia University Press.

Volk, Tyler (2004). Gaia Is Life in a Wasteworld of By-products. En **Scientist Debate Gaia**. Schneider, S. H, Miller, J. R, Crist, E. and Boston, P. J (editors), 27- 36. USA: Massachussets Institute of Technology.

#### Referencias de Gaia y la Sistemodinámica

Anjali-Sastri, M. & Sterman, J.D. 1992. Desert Island Dynamics: An Annotated Survey of the Essential System Dynamics Literature. System Dynamics Group: Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA USA 01242.

Medín Molina, J.2003. Modelado de sistemas dinámicos y educación. Annual Best Practices Conference on Teaching and Learning-AMP, UPR-Bayamón, 31/Oct. 2003.

Medín Molina, J. Sistemodinámica: una propuesta de convergencia de la ciencia, la tecnología y la filosofía.

Medín-Molina, J. Junio 2004. Taller sobre construcción de modelos de sistemas dinámico. UPR-Bayamón.

Sanfiorenzo-de Orbeta, M. S. & Morales-De Jesús, R. J. El Mundo de las Margaritas de James Lovelock - Un Modelo de Sistemodinámica – Investigación de Verano del programa PRLSAMP. Junio-Agosto 2004.

#### Artículos de investigación

Gillon, J. 2000. Feedback on Gaia. *Nature* **406**, 17 August 2000, 685-686.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. 2001. Daisyworld revisited: quantifying biological effects on planetary self-regulation. *Tellus* **53B**, 288-305.

Lovelock, J.E. 2003. The living Earth. *Nature* **426**, 18/25 December 2003, 769-770.

Lovelock, J.E. 1992. A numerical model for biodiversity. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* **338** (1286), 383-391.

Lovelock, J.E. 1986. Gaia: The world as living organism. *New Science* 18 Dec., 25-28

Schellnhuber, H. J. 1999. 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* **402**, 2 December 1999, C19-C23.

Weber, S.S. 2001. On homeostasis in Daisyworld. *Climate Change* **48**, 465-485.

#### Artículos del Internet

La hipótesis de Gaia. Enciclopedia Latinoamericana Digital Aunm@s.

[http://www.aunmas.com/doc/show\\_doc.php?doc=verdes&sec=1.1&page=1](http://www.aunmas.com/doc/show_doc.php?doc=verdes&sec=1.1&page=1) ?

Accesado el 15 de julio de 2004.

Modeling Daisyworld. [http://www.acad.carleton.edu/curricular/GEOL/DaveSTELLA/Daisyworld/daisyworld\\_model.htm](http://www.acad.carleton.edu/curricular/GEOL/DaveSTELLA/Daisyworld/daisyworld_model.htm); Accesado el 3 de junio de 2004.