



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

**“INTRODUCCION A LA INGENIERIA AMBIENTAL PARA
LA INDUSTRIA DE PROCESOS”**

DR. CLAUDIO ALFREDO ZAROR ZAROR
PROFESOR TITULAR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Concepción – Chile

CAPÍTULO 2

EL ENTORNO NATURAL

Para comprender el impacto ambiental de nuestra actividad sobre el medio ambiente, requerimos un conocimiento básico de los diferentes fenómenos físicos, químicos y biológicos, que caracterizan el funcionamiento de la Tierra, además de sus interacciones. En rigor, esta área temática cae dentro del dominio de la ecología¹, integrando conceptos provenientes de la geología, la biología, la bioquímica, la química, la termodinámica y otras ciencias fundamentales, cuya revisión completa es imposible en unas pocas páginas.

En este capítulo, se presentan los principales tópicos y definiciones básicas que permitirán entregar una base introductoria. El lector encontrará varios textos generales en la sección de Referencias Recomendadas, que cubren los diferentes aspectos de las ciencias ambientales con mayor profundidad: Arms (1990), Botkin y Keller (1995), Goudie (1989, 1990), Margalef (1992), Meyer (1996), Miller (1996), Nebel y Wright (1996), Raven (1993), entre otros.

2.1) LA TIERRA

Cuando se estudia la Tierra, es importante tener presente las dimensiones temporales y espaciales que ello implica. Existe consenso dentro de la comunidad científica que Nuestro Hogar, la Tierra, ya contaba con una sólida superficie de rocas hace aproximadamente 4500 millones de años. Por su parte, los fósiles microscópicos más antiguos datan de unos 3500 millones de años, mientras que se ha descubierto fósiles macroscópicos marinos de hace 500 millones de años. Desde ese entonces, la vida se ha propagado hacia la superficie terrestre, donde han aparecido plantas, peces, reptiles, aves y mamíferos, etc. Cuando pensamos que la existencia del *Homo sapiens* sólo data de 40 mil años atrás, nos damos cuenta de nuestro insignificante peso dentro de la historia, a escala geológica. Ello es aún más impactante si se compara con la “edad” del Universo, la que de acuerdo a la teoría de la Gran Explosión (*Big Bang*), sería de 15-20 mil millones de años.

La Tierra es un planeta elipsoidal de 6730 km de radio medio, que gira alrededor del Sol en un ciclo anual. El eje de la Tierra está inclinado 23,5° respecto de su plano de rotación alrededor del Sol.

¹ Ecología es el estudio de las relaciones entre los organismos y su ambiente.

El término proviene del griego: *oikos* (casa) y *logos* (estudio), y fue propuesto por el biólogo alemán Ernst Haeckel en el siglo XIX. Fue considerada durante mucho tiempo como una subdivisión de la biología; sin embargo, su acelerado desarrollo en las últimas décadas, ha llevado a su consolidación como una disciplina integradora que relaciona procesos físicos y biológicos, y que tiende un puente natural entre las ciencias naturales y las ciencias sociales (E.P. Odum, “Fundamentos de ecología”. Nueva Editorial Interamericana, México. 1986).

Está cubierta por una delgada corteza exterior (litosfera), de 30-40 km de espesor en la zona continental y 6 km en la zona oceánica, que contribuye con menos del 1% de la masa total de la Tierra. La corteza está compuesta por placas tectónicas que se mueven a una velocidad entre 2 y 15 cm/año. Los límites entre estas placas son áreas geológicamente activas, con gran actividad volcánica y sísmica.

La superficie del planeta es irregular, con un 70% de ella cubierta por agua, con una profundidad de hasta 11 km (promedio, 4 km). La superficie restante corresponde a las masas de tierra, cuya altura máxima sobre el nivel del mar alcanza los 8,8 km. Dos tercios de esta masa están situadas sobre el Hemisferio Norte.

La composición de la corteza es muy heterogénea, con un alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 , aún cuando en las zonas más superficiales (capa sedimentaria) hay importantes cantidades de CaO y carbonatos. Bajo la corteza existe una zona de casi 2900 km. de espesor, llamada Manto, que representa el 69% de la masa total del planeta. El manto tiene un alto contenido metálico en estado fluido (magma), con una predominancia de óxidos de Si, Mg, Fe y Al. La zona central de la Tierra, es decir entre 2900 y 6370 km. de profundidad, se denomina el Núcleo y representa alrededor del 30% de la masa del planeta. El Núcleo tiene una temperatura estimada de 2000°C y está compuesto en un 80% por Fe y Ni; el resto por Si y S.

Cuando el magma aflora a la superficie, o cerca de ella, se enfría y cristaliza formando las rocas ígneas. La acción erosiva del viento y el agua, y las variaciones de temperatura destruyen las rocas ígneas y generan sedimentos. Estos sedimentos se acumulan en las profundidades de los océanos y lagos, transformándose en rocas sedimentarias. Cuando las rocas sedimentarias quedan sepultadas a varios kilómetros de profundidad, las altas temperaturas y presiones las transforman en rocas metamórficas. Estas últimas pueden derretirse y, eventualmente, transformándose en rocas ígneas. Los procesos vivientes afectan la composición química de las rocas aportando carbono (ej.: carbonatos, carbón, hidrocarburos).

La vida en la Tierra está confinada a una región relativamente pequeña, llamada Biósfera, que se encuentra en torno a la interfase entre la atmósfera y la superficie (tierra y océano), donde existen condiciones de presión, temperatura y composición química favorables para el desarrollo de la vida.

La Atmósfera

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa, llamada atmósfera, cuyo espesor alcanza aproximadamente 200 km. En la atmósfera se distinguen 4 capas, con diferentes perfiles de concentración:

- la tropósfera (0-10 km desde la superficie terrestre): La temperatura desciende con la altura, llegando a alrededor de -60°C a 10 km de altura.
- la estratósfera (10-50 km): El perfil de temperatura experimenta una fuerte

inversión, aumentando hasta cerca de los 0°C. En esta capa el ozono experimenta un nivel máximo de concentración.

- la mesósfera (50-90 km): La temperatura vuelve a descender hasta llegar a valores inferiores a -100°C en su parte superior.
- la termósfera (90-200 km): Aquí la temperatura asciende hasta alcanzar niveles sobre 1.000°C.

La atmósfera contiene, en promedio, 78,1% (en volumen) de N₂, 20,9% de O₂, 0,93% de Argón, 0,033% de CO₂, excluyendo el vapor de agua presente. Este último puede constituir hasta un 7% del volumen total. El resto, menos de 0,02 % del volumen total de la atmósfera, está constituido por una mezcla de gases nobles (Ne, He, Kr, Xe), CH₄, H₂, N₂O, CO, O₃, NH₃, NO₂, NO y SO₂.

Las capas superiores de la atmósfera reciben la radiación solar ultravioleta, dando origen a complejas reacciones químicas en las que participan el O₂, el N₂ y el O₃. Dichas reacciones permiten absorber una gran fracción de la radiación ultravioleta, impidiendo su llegada a la superficie terrestre.

La temperatura global del planeta (del orden de 15°C), está determinada por un delicado balance entre la radiación solar que llega a la Tierra y la energía neta que ella irradia al espacio, tal como se ilustra en la Figura 2.1. Un factor esencial de este balance térmico es la cantidad de energía absorbida por los diferentes componentes de la atmósfera. Dichos compuestos químicos absorben radiación en rangos de longitud de onda característicos para cada uno de ellos. Por esta razón, la composición química de la atmósfera juega un papel determinante en este balance, ya que ésta absorbe parte de la radiación solar y de la energía radiada por la Tierra.

A su vez, la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, es absorbida por aquellos gases atmosféricos que absorben ondas largas (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O, O₃), y re-emitida hacia la superficie, produciendo un "efecto de invernadero". Estos "gases invernadero" son los que mantienen la temperatura de la Tierra a los niveles que conocemos. Si dichos gases no existieran, la temperatura global de la Tierra sería del orden de -18°C.

La atmósfera es un sistema dinámico que cambia continuamente. A escala global, las masas de aire circulan como resultado de la rotación terrestre y de la radiación solar, dando origen a padrones de vientos, y cinturones de altas y bajas presiones en diferentes latitudes.

El **clima** se refiere a las condiciones atmosféricas (principalmente, temperatura y precipitación) características o representativas en un lugar determinado. En general, se habla de clima cuando nos referimos a períodos largos (varios años), mientras que se habla de condiciones climáticas ("estado del tiempo", "condiciones meteorológicas") para describir las condiciones de la atmósfera en períodos cortos (días, o semanas).

El clima y las condiciones climáticas en diferentes partes de la Tierra depende de las propiedades físicas y la composición química de la atmósfera, y del flujo de energía solar que llega a la superficie terrestre.

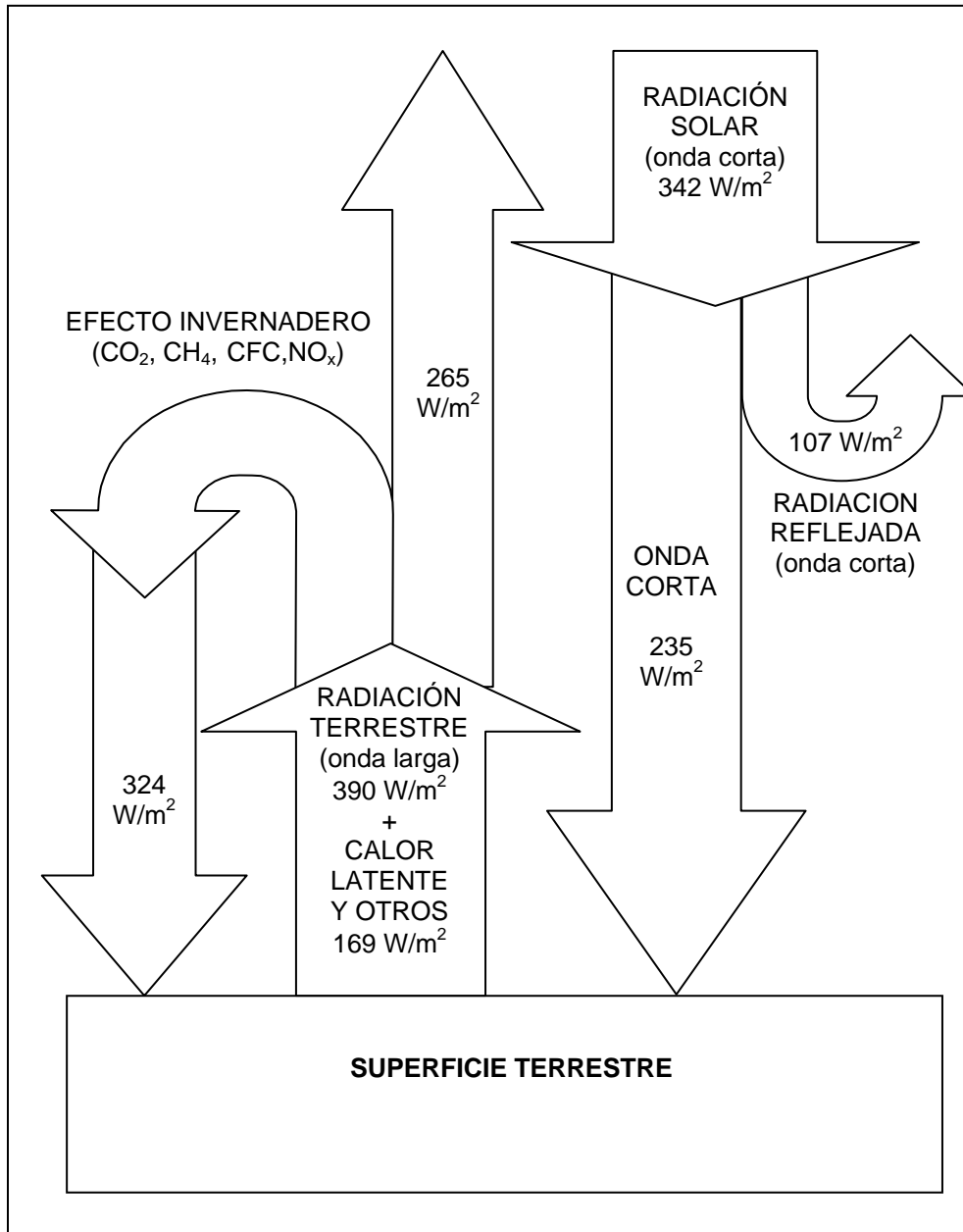


FIGURA 2.1: BALANCE TÉRMICO TERRESTRE

La cantidad de energía solar que alcanza la superficie terrestre varía con la latitud (distancia desde el ecuador), siendo mayor en la zona ecuatorial. Por lo tanto, el aire de la tropósfera está más caliente en el ecuador y más frío en los polos. Sobre el ecuador, el aire caliente posee una baja densidad y se eleva hasta alcanzar suficiente altura, desde donde se mueve en dirección hacia los polos. Al llegar a los polos, las masas de aire se enfrían y fluyen hacia la superficie debido a su mayor densidad. Al alcanzar la superficie de las zonas polares, estas masas de aire frío circulan a baja altura en dirección al ecuador.

En general, existen cinturones de baja presión a lo largo del Ecuador y entre las latitudes 50° y 60° Norte y Sur, como resultado de las columnas de aire ascendentes. Por su parte, existen cinturones de alta presión entre las latitudes 25° y 30° Norte y Sur, donde prevalecen masas de aire descendente. Los principales desiertos de la Tierra están ubicados en aquellas zonas donde existen altas presiones “atrapadas” entre las bajas presiones del cinturón ecuatorial y de los dos cinturones de baja presión.

A medida que avanzan hacia y desde los polos, las masas de aire sufren la acción desviadora de Coriolis, generando patrones de circulación característicos en diferentes regiones². Más aún, existen variaciones (diarias y estacionales) en la distribución de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre.

Estos padrones de circulación de las masas de aire en la troposfera tienen un gran efecto sobre la distribución de las precipitaciones sobre la superficie. Los grandes flujos de energía solar en la zona ecuatorial resultan en la evaporación de enormes cantidades de agua desde la superficie, llegando a niveles cercanos a saturación. Cuando estas masas de aire húmedo se elevan y se enfrían, se produce la condensación del vapor de agua, precipitando en las cercanías del ecuador (clima tropical). Una vez que dichas masas de aire se han movido 30° (latitud Norte y Sur en dirección hacia los polos) se ha perdido gran parte de su humedad, lo que explica las bajas precipitaciones que se constatan en esas regiones (clima seco, desértico, semiárido). Al seguir su viaje en dirección a los polos, estas masas de aire cálido comienzan a incrementar sus niveles de humedad, generando precipitaciones a medida que se acercan a las zonas polares (latitudes 60° Norte y Sur). Al llegar a los polos, las masas de aire presentan bajos contenidos de humedad.

Existen diferentes tipos de clima, en base a diferentes criterios de clasificación, entre los cuales figuran: clima tropical, subtropical, subártico, ártico, continental húmedo, desértico, etc. A escala regional, las masas de aire que cruzan los océanos y continentes pueden tener un significativo efecto sobre los padrones estacionales de precipitaciones y temperaturas. A nivel local, las condiciones climáticas (microclimáticas) pueden variar drásticamente de un lugar a otro.

² Para una descripción sencilla y amena acerca del clima y la meteorología se recomienda el texto de M. Medina “Iniciación a la Meteorología” 8ª edición. Editorial Paraninfo. Madrid. (1994).

La temperatura y las precipitaciones juegan un importante papel en determinar las condiciones de vida existentes en una región, por lo que existe una estrecha relación entre el clima y los tipos de especies vivientes. Esto sugiere que si se conoce el clima de una región, se podría predecir que tipo de especies se encuentran allí, y en que cantidad. Para estos efectos, la biosfera se puede dividir en tipos de ecosistemas (llamados biomas) caracterizados por el tipo de clima prevaleciente (ej.: desértico, bosque tropical, praderas)³.

2.2) LA VIDA

La teoría más establecida acerca del desarrollo de la vida en la Tierra supone que existió una evolución gradual a partir de moléculas inorgánicas simples. Todos los seres vivientes de este planeta están compuestos de moléculas orgánicas, es decir, donde la estructura básica está dada por cadenas de carbono. Muchos de estos compuestos orgánicos pueden ser sintetizados a partir de reacciones entre H_2O , NH_3 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2S y H_2 . Se cree que todas estas moléculas simples estaban presentes en la atmósfera y en los océanos de la Tierra primitiva, en épocas remotas, donde los rayos ultravioleta provenientes del Sol llegaban a la superficie terrestre sin mayor protección, permitiendo el curso de interminables reacciones químicas que derivaron en la formación de compuestos orgánicos estables, de complejidad creciente. El paso crucial desde tales moléculas orgánicas, hasta los sistemas capaces de autoreplicarse, es decir, desde lo inerte a lo vivo, es aún materia de especulación y su discusión cae fuera de los marcos de este texto.

Hace unos 2.000 millones de años atrás, la atmósfera primaria contenía altas concentraciones de compuestos reductores, con sólo trazas de O_2 . Predominaba la actividad de microorganismos procariotes (bacterias) anaeróbicos, que generaban CH_4 , CO_2 , H_2S y H_2 . Por otra parte, la actividad de microorganismos fotosintéticos, permitía sintetizar compuestos orgánicos a partir de CO_2 y luz, generando, además, O_2 . Hace 600-1000 millones de años atrás, una fracción importante de la materia orgánica, quedó parcialmente descompuesta en sedimentos anóxicos o sepultada completamente y fosilizada sin sufrir oxidación. Ello habría producido un desbalance entre la actividad fotosintética y la oxidación, permitiendo la acumulación de oxígeno en la atmósfera y la evolución hacia formas superiores de vida. Hace aproximadamente 300 millones de años, se generó un gran exceso de materia orgánica viviente, que condujo a la formación de los combustibles fósiles que hoy sostienen el desarrollo industrial.

Actualmente, cada año se producen más de 100 mil millones de toneladas de materia orgánica como resultado de la actividad de los organismos fotosintetizadores, generando O_2 como subproducto. Paralelamente, se oxida una cantidad equivalente de materia orgánica, formando CO_2 y H_2O , como resultado de la actividad respiratoria de los seres vivos y de los procesos de combustión. La proporción entre el O_2 y el CO_2 en la atmósfera depende del balance biótico, de la actividad volcánica, de los

³ Para mayores detalles se recomiendan los textos de Botkin y Keller (1995), y Miller (1990)

procesos de sedimentación, de la radiación solar, entre otros. Estos aspectos se abordan en mayor detalle más adelante en este capítulo, en las secciones sobre los ciclos del carbono y del oxígeno.

En la actualidad, se estima que existen más de 30 millones de especies en la Tierra, de las cuales han sido catalogadas aproximadamente un millón y medio de especies animales, y medio millón de especies de plantas, cada una de las cuales posee su propio nicho ecológico (es decir, realiza funciones y ocupa un hábitat específico).

Los organismos fotosintetizadores tienen la propiedad de capturar la energía solar y convertirla en energía química, para formar estructuras moleculares de diversa complejidad, como los azúcares, almidones, proteínas, grasas y vitaminas. Esta capacidad de alimentarse por sí mismos es la razón por la que se denominan **organismos autótrofos**.

Todos los demás organismos obtienen su energía de otras fuentes, llamándose **organismos heterótrofos**. Existe, por lo tanto, una **cadena alimenticia** o **cadena trófica**, en la que los organismos autótrofos constituyen el **nivel primario** o primer nivel trófico (ej.: plantas, fitoplancton). Todos los heterótrofos que obtienen su energía directamente de los autótrofos se llaman **consumidores primarios**, ocupando el segundo lugar en la cadena trófica; aquí se incluyen todos los herbívoros (ej.: la vaca, el saltamontes, zooplancton). Todos los depredadores que se alimentan de los consumidores primarios corresponden al tercer nivel de la cadena trófica y se denominan **consumidores secundarios** (ej.: la lechuza, el lobo, la ballena). El cuarto nivel trófico corresponde a aquellos **consumidores terciarios**, capaces de alimentarse de los consumidores secundarios. Los **omnívoros** son aquellas especies capaces de alimentarse tanto de vegetales como de animales (ej.: el hombre, el oso, la rata). Otro grupo que juega un papel importante en el reciclaje de materia y energía, lo constituyen los organismos **saprótrofos** que obtienen su energía por degradación de tejidos muertos o por absorción de detritos (es decir, materia orgánica resultante de la descomposición de organismos muertos). Los saprótrofos (ej.: bacterias, hongos, nemátodos, caracoles, ostrácodos, etc) desintegran las estructuras biológicas liberando nutrientes orgánicos que pueden utilizar los productores, a la vez que en sí mismos, constituyen alimento para los consumidores. Si tal descomposición no ocurriera, todos los nutrientes quedarían atrapados en los organismos muertos, limitando la generación de nuevos seres vivos. La acción de descomposición de las bacterias y hongos se basa en enzimas líticas, especializadas en la desintegración de macromoléculas y otros compuestos orgánicos bióticos. Dichas enzimas son secretadas sobre los cadáveres y su acción degradativa genera compuestos de menor peso molecular que son absorbidos por los saprófagos que permanecen en el medio. Ninguna especie de saprótrofos es capaz de descomponer por sí sola un organismo muerto; sin embargo, las poblaciones de desintegradores presentes en la biósfera, pueden descomponer colectivamente un cuerpo por completo. La velocidad de descomposición de los diferentes componentes de los cadáveres de plantas y animales, varía de acuerdo a su estructura química: los azúcares, las grasas y las proteínas se descomponen con mayor rapidez, mientras que la celulosa, la lignina y la quitina, se degradan más

lentamente. Los productos más resistentes terminan como *sustancias húmicas*⁴, que son mineralizadas lentamente por la acción de organismos anaeróbicos en los sedimentos marinos o en el suelo terrestre. Esto último constituye un factor de retardo en la descomposición de la materia orgánica y tiene una gran importancia en el ciclo global del oxígeno.

Los detritos, las sustancias húmicas y otros tipos de materia orgánica en descomposición, son importantes para la fertilidad del suelo, ya que generan una estructura favorable para el desarrollo vegetal. Además, algunos de estos compuestos orgánicos forman complejos quelantes con iones metálicos, manteniéndolos en forma soluble y con menor acción tóxica permitiendo así una mayor disponibilidad biológica de tales metales.

Las cadenas tróficas no constituyen secuencias aisladas, sino que se interconectan formando **redes tróficas**. Estas redes son expresión de la complejidad de las relaciones entre las especies dentro de un ecosistema. Basta imaginar la cadena trófica asociada a la descomposición de los organismos muertos, donde miles de especies y millones de individuos se alimentan a partir de los organismos muertos y de los detritos, generando alimento y nutrientes para otros heterótrofos y autótrofos.

Los seres vivos y su entorno “inerte”, se relacionan de manera inseparable, a través de complejas interacciones. Estas son a menudo tan delicadas, que una perturbación relativamente pequeña en una característica ambiental puede provocar serias alteraciones en otros componentes del sistema natural.

2.3) LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS

Un ecosistema⁵ está constituido por los seres vivientes que habitan en un área determinada, formando una comunidad biótica⁶, donde interactúan con el medio físico (abiótico). Cada componente del ecosistema influye sobre las propiedades del otro. Dentro del ecosistema existe un flujo de energía que conduce a la formación de estructuras bióticas definidas y al reciclaje de materia entre las partes que lo constituyen. Como se mencionó en párrafos anteriores, los nutrientes que forman parte de individuos de una especie, provienen de la muerte y de la desintegración de individuos de otras especies, y los materiales circulan y se transforman en forma eficiente. Aún cuando cada individuo de una especie tiene una actividad independiente, ellos están entrelazados en forma cooperativa. Las excretas u otros subproductos del metabolismo de los seres vivos son vertidas al entorno físico (agua, suelo y aire), donde pasan a formar parte de nuevos procesos biológicos y/o físico-

⁴ Las sustancias húmicas poseen estructuras químicas complejas, de tipo amorfo y coloidal. Son condensaciones de anillos aromáticos combinados con productos de la descomposición de proteínas y polisacáridos. Los ácidos húmicos poseen anillos fenólicos, estructuras cíclicas y cadenas laterales nitrogenadas, y unidades de carbohidratos.

⁵ Un “sistema” se define como un conjunto de componentes que se interrelacionan o actúan juntos, formando un todo unificado.

⁶ El término “comunidad biótica” se emplea para designar todos los grupos de individuos de cualquier especie que ocupan una cierta área.

químicos.

Generalmente, cuando el hombre interviene en un ecosistema lo simplifica, reduciendo el número de componentes. En tales intervenciones reemplazamos miles de especies de plantas y animales presentes en los ecosistemas por monocultivos, o por infraestructura antrópica (carreteras, edificios). Al reducir la biodiversidad, las especies remanentes son vulnerables al ataque de especies invasoras no deseadas (ej.: malezas, plagas).

En rigor, el ecosistema es un sistema abierto que permite la entrada y la salida de materia y energía, aún cuando en algunos casos estos flujos son relativamente pequeños en comparación con las cantidades que se reciclan al interior de éstos. Los flujos de energía y materiales de entrada y salida son mayores a medida que la actividad metabólica, dentro del ecosistema, aumenta, o cuando el desequilibrio entre organismos autótrofos y heterótrofos es muy grande.

En la Naturaleza, siempre que un objeto se mueve, se calienta o se enfría, o sufre alteraciones químicas, hay intercambio de energía. La energía se define como la capacidad para hacer trabajo y su comportamiento está descrito por las leyes de la termodinámica. En forma muy simplificada:

- La primera ley establece que la energía puede ser transformada de un tipo a otro, pero no se crea ni se destruye.
- La segunda ley plantea que ningún proceso de transformación de energía ocurre espontáneamente, a menos que, haya una degradación de la energía de una forma concentrada a una forma dispersa.

Así, el calor presente en un cuerpo se dispersará espontáneamente hacia sus entornos más fríos. Una fracción de la energía se convierte en energía calórica no utilizable, por lo que ninguna transformación espontánea de energía tiene una eficiencia 100%. La entropía es una medida de la energía no disponible resultante de las transformaciones, y es un índice del desorden asociado con la degradación de la energía. *Los organismos, los ecosistemas y la biosfera entera, poseen la característica esencial de que pueden crear y mantener un alto grado de orden interno (es decir, una baja entropía).* La baja entropía se logra a través de una efectiva disipación de la energía de gran calidad (luz, enlaces químicos) hacia energía de baja calidad (ej.: calor).

En el ecosistema, el “orden” dentro de una compleja estructura viviente, se mantiene gracias a la respiración de la comunidad que “bombea” continuamente el desorden hacia fuera. En otras palabras, los ecosistemas y organismos son sistemas termodinámicamente abiertos, que intercambian continuamente materia y energía con el medio para reducir su propia entropía interna e incrementar la externa:

Es evidente que la cadena trófica constituye la vía por la que circula la energía y los materiales, desde su fuente primaria (es decir, energía solar y CO₂ atmosférico) hacia los diferentes compartimentos biológicos que conforman un ecosistema. En cada nivel trófico, una parte importante de la energía recibida se disipa en diferentes procesos físicos y químicos que forman parte del metabolismo de las especies,

quedando sólo una pequeña fracción incorporada en los nuevos materiales almacenados.

A modo de ejemplo ilustrativo del flujo energético, consideremos una planta que recibe 1000 calorías de energía lumínica, la mayor parte de la cual se refleja o transmite a través del tejido sin ser absorbida. Una gran fracción de la energía absorbida es almacenada en forma de calor y utilizada en la evaporación del agua de las hojas y otros procesos físicos, tales como el transporte hídrico dentro de la planta. El resto se utiliza en los procesos vitales, quedando un equivalente a 5 calorías almacenadas en el tejido como material rico en energía. Este constituye un potencial energético adecuado para la alimentación de otros animales. Aquel herbívoro, por ejemplo un venado, que coma dicha planta que contiene 5 calorías de energía alimenticia, gastará el 90% de la energía recibida para mantener su metabolismo y sólo convertirá 0,5 calorías en nuevo material corporal. A su vez, el carnívoro que se alimenta de aquel herbívoro ocupará sólo una pequeña fracción de la energía obtenida, en un nuevo peso corporal (en este caso menos de 0,05 calorías). De este modo, la energía química aprovechable en los procesos vitales, va disminuyendo a medida que se asciende en la cadena trófica.

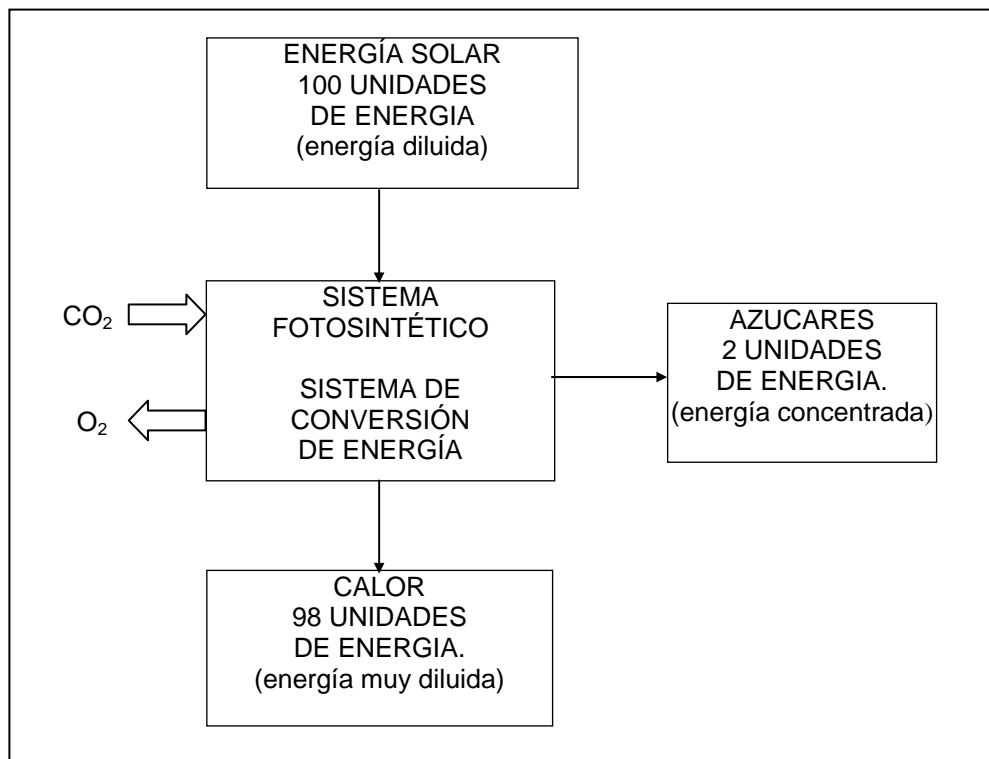


FIGURA 2.2: LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS

En los ecosistemas terrestres y acuáticos, se requiere de gran producción primaria para mantener una proporción pequeña de depredadores, resultando una distribución piramidal de la tasa de producción. El hombre tiene la ventaja de que puede ocupar posiciones como consumidor primario, secundario o terciario en la cadena alimenticia, lo que le confiere una mayor capacidad para obtener los recursos energéticos y materiales para su funcionamiento fisiológico.

El origen y la calidad de la energía disponible, determinan, en mayor o menor medida, los tipos y cantidad de organismos vivos, las funciones y el estilo de vida de los seres humanos. Los ecosistemas son impulsados por dos fuentes básicas de energía: energía solar y energía química (es decir, oxidación de compuestos orgánicos, reacciones nucleares, reacciones exotérmicas). De acuerdo a la fuente de energía que los impulsa, los ecosistemas pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ***Ecosistemas naturales impulsados por el Sol***

Constituyen el módulo básico de sostén de vida en la Tierra. El flujo energético medio anual es del orden de $0,3 \text{ W/m}^2$. Este flujo energético, representa la magnitud de trabajo potencial o real que hay en una unidad de área del ecosistema y, también, la cantidad de entropía que debe ser disipada para que el sistema mantenga su funcionamiento. Corresponden a esta categoría de ecosistema: los océanos abiertos, las grandes extensiones de bosques y praderas, los amplios y profundos lagos, en donde la energía solar directa constituye la principal fuente de energía, existiendo otros factores que limitan el desarrollo de la vida como, por ejemplo, escasez de nutrientes o agua. En general disponen de poca energía y su productividad es reducida.

- ***Ecosistemas impulsados por el Sol, subsidiados por otras fuentes naturales de energía***

Estos son sistemas naturalmente productivos, que no sólo tienen una alta capacidad para sostener la vida, sino que, producen un exceso de materia orgánica que se exporta a otros sistemas o se almacena. El flujo energético anual medio es del orden de 3 W/m^2 . Un estuario es un buen ejemplo de este tipo de ecosistemas, en donde, además de la energía solar directa, se cuenta con la energía de las olas, mareas y corrientes, que permiten reciclar parcialmente los nutrientes minerales, transportan alimentos y desechos, permitiendo a los organismos llevar a cabo una conversión de energía solar más eficiente. Estos subsidios energéticos pueden tener muchas otras formas, tales como la lluvia y el viento en un bosque tropical, o la materia orgánica y los nutrientes provenientes de las hojas muertas recibidos en un pequeño lago desde una vertiente.

- ***Ecosistemas impulsados por el Sol, subsidiados por el Hombre***

La agricultura, la acuicultura y la silvicultura son claros ejemplos de esta categoría. La fuente primaria de energía para el desarrollo de la vida en tales

ecosistemas sigue siendo el Sol, pero con un considerable aporte de energía entregada por el hombre. Los flujos energéticos son del orden de 5 W/m^2 . Se obtienen grandes rendimientos en los cultivos alimenticios mediante los aportes de combustibles, energía mecánica animal, riego, fertilización, selección genética y control de plagas, todos los cuales representan energía adicional aplicada directa o indirectamente. Tomando las palabras del ecólogo H.T. Odum *los alimentos y fibras obtenidos de la producción agrícola y forestal se hacen en parte, de petróleo.*

- **Ecosistemas urbano-industriales impulsados por combustibles**

La "obra maestra de la Humanidad". La energía potencial altamente concentrada de los combustibles reemplaza en gran medida a la energía solar, con flujos energéticos en el rango $10\text{-}400 \text{ W/m}^2$. Una ciudad como Tokio, tiene una densidad de consumo energético del orden de 400 W/m^2 (cifra comparable con la energía solar que llega a la superficie terrestre: $130\text{-}300 \text{ W/m}^2$), y el promedio para la Cuenca Industrial del Río Rin de 10 W/m^2 . En su extremo más drástico, ello representa una seria anomalía del desarrollo social moderno, ya que el complejo urbano-industrial se transforma en un verdadero parásito de los otros ecosistemas, tomando de ellos los materiales y combustibles, lo que genera nuevas riquezas y nuevos residuos. Si se lograra utilizar en forma concentrada la energía solar directa en los centros urbanos, para suplir sus diferentes requerimientos energéticos y materiales primarios, y reemplazar parcialmente los combustibles fósiles y la importación de alimentos desde las zonas rurales, ello tendría un efecto global beneficioso para la Humanidad y su entorno natural.

Aparte de la distribución de energía en la cadena trófica, es interesante revisar el flujo de materia, particularmente de aquellos compuestos que por sus características químicas tienden a concentrarse en cada eslabón de la cadena alimenticia. Un ejemplo ilustrativo es el caso del DDT utilizado para controlar las poblaciones de mosquitos en los humedales del Sur de EEUU, durante varios años. El DDT, además de ser altamente tóxico, es liposoluble, por lo que tiende a acumularse en los tejidos grasos. A pesar de que el DDT se aplicó en dosis inferiores a los niveles de toxicidad aguda para plantas, peces y otros animales, los residuos venenosos de DDT persistieron en el ecosistema por largos períodos, lo que permitió su acumulación en los distintos niveles tróficos. El DDT se adsorbió en los detritos y se acumuló en los detritívoros, peces pequeños y depredadores de mayor tamaño. Como resultado, la concentración de DDT mostró un significativo aumento a mayores niveles de la cadena trófica, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

La amplificación biológica es característica de muchos plaguicidas, particularmente de aquellos basados en compuestos organoclorados. El DDT fue prohibido a fines de la década de los 70, cuando se comprobó su efecto negativo sobre las aves (alteraciones al metabolismo del calcio) y el peligro potencial sobre la salud humana.

TABLA 2.1: CONCENTRACIÓN DE DDT EN DISTINTOS NIVELES DE LA CADENA TRÓFICA⁷

NIVELES DE LA CADENA TRÓFICA	CONCENTRACIÓN DE DDT (MG DDT / KG PESO SECO DE ORGANISMOS)
Agua (mg/litro agua)	0,00005
Plancton	0,04
Carpita plateada	0,23
Lucio pequeño (depredador)	1,33
Pez aguja (depredador)	1,33
Gaviotín (depredador de animales pequeños)	3,91
Gaviota (carroñera)	6,00
Cuervo marino	22,8
Cormorán (depredador de peces mayores)	26,4

2.4) EQUILIBRIOS EN UN ECOSISTEMA

Los ecosistemas están sujetos a constantes estímulos “perturbadores”, tales como: cambios climáticos, variaciones en la humedad, temperatura, radiación solar; además los organismos crecen y a su vez son devorados por otros, varían los índices de fertilidad, existen migraciones, el suelo pierde o recibe nutrientes, etc.. A pesar de estos cambios constantes, los ecosistemas presentan un cierto nivel de estabilidad, ya sea resisten las tensiones del medio, o se recuperan con rapidez de una perturbación. En todos los ecosistemas intervienen un conjunto de factores opuestos que se conjugan para mantener un equilibrio dinámico, donde los organismos vivos juegan un papel fundamental. A nivel del ecosistema existen, entre otros, subsistemas microbianos que regulan el almacenamiento y la liberación de nutrientes; y subsistemas del tipo depredador-presa que controlan las poblaciones. Se ha observado que mientras mayor sea la biomasa presente y su diversidad, mayor es su nivel de estabilidad frente a diferentes perturbaciones.

Los flujos de materia y energía en los ecosistemas constituyen también flujos de información química y física entre las partes constituyentes, análogos a los mensajeros nerviosos y hormonales de los organismos superiores. Estos flujos están organizados de modo que regulan el sistema como un todo, otorgándole un cierto grado de estabilidad. El mecanismo de regulación dominante que se observa en los sistemas naturales, corresponde a un control con retroalimentación negativa, tal como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.3.

⁷ Datos citados por E.P Odum *op.cit.*

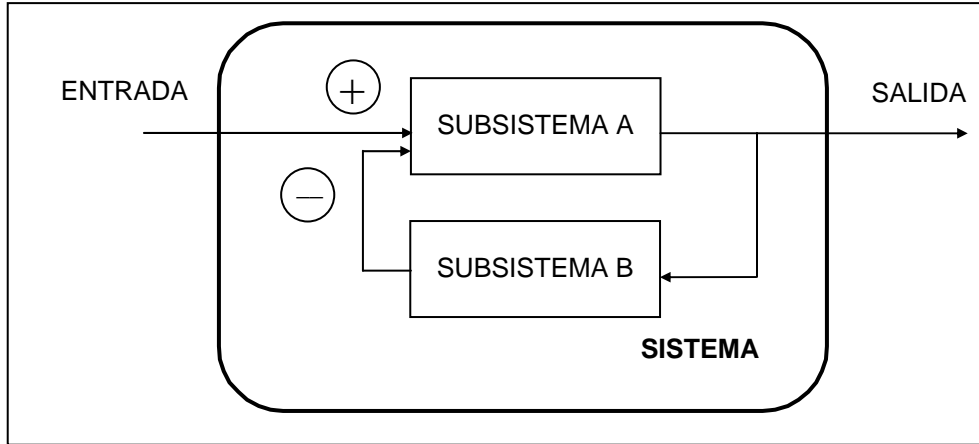


FIGURA 2.3: CONTROL RETROALIMENTADO EN ECOSISTEMAS

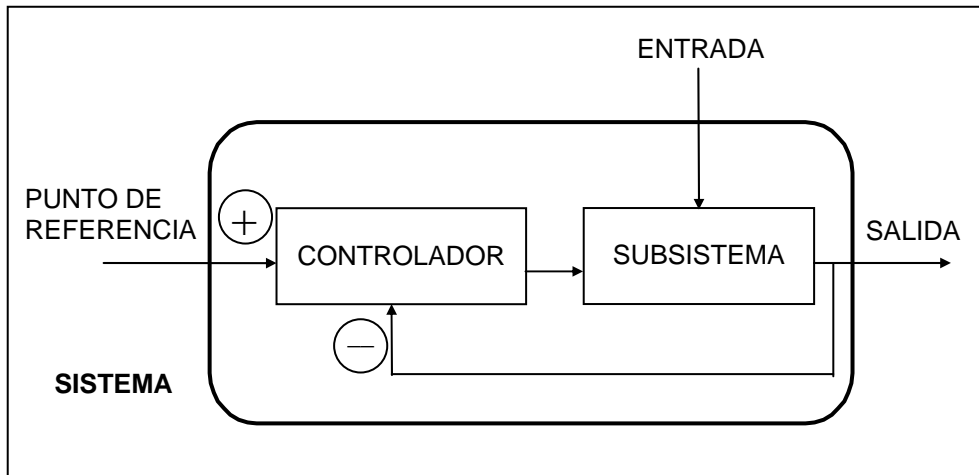


FIGURA 2.4: CONTROL HOMEOSTÁSICO EN LOS ORGANISMOS

En este caso, los mecanismos de control son internos y difusos, con interacciones entre los subsistemas primarios y secundarios. Además de este mecanismo, la estabilidad de los ecosistemas se mantiene gracias a una redundancia en los componentes funcionales; es decir, más de una especie o componente es capaz de ejecutar una función determinada. Por ejemplo, si existen varias especies autotróficas, con diferentes temperaturas óptimas, la tasa de fotosíntesis en la comunidad puede mantenerse relativamente estable frente a cambios en la temperatura.

En los seres vivos, el mecanismo de regulación retroalimentado, presenta un controlador externo, que tiene un punto de referencia previamente especificado⁸.

En los ecosistemas, el tamaño de las poblaciones y las proporciones entre ellas muestran oscilaciones aún en aquellos sistemas con mayores niveles de estabilidad. Si en un ecosistema hay suficiente alimento y no existe depredación, una bacteria que se duplique cada 20 minutos, daría origen a 10^{43} bacterias en menos de dos días. En general, todas las especies tienen un gran potencial biótico, es decir, pueden desarrollarse rápidamente si las condiciones en el ecosistema favorecen su crecimiento. Sin embargo, existen presiones ambientales que inhiben el potencial de crecimiento de las especies.

El nivel poblacional de una especie en cualquier ecosistema está controlado por los elementos esenciales para la vida (es decir, nutrientes y factores físicos). Aquellos elementos que se encuentren muy cercanos a los límites de tolerancia, se constituyen en factores limitantes. Los límites de tolerancia incluyen un nivel mínimo y máximo para cada factor relevante.

Entre los factores físicos ambientalmente importantes en tierra, se incluyen: la luz, la temperatura, la humedad, el pH, los nutrientes, el espacio disponible y el viento. En el ambiente marino, se deben considerar: la luz, la temperatura, el oxígeno, el pH, los nutrientes, la salinidad y las corrientes marinas.

La temperatura es un factor ambiental de máxima importancia. Existen especies de bacterias y algas capaces de sobrevivir a niveles de hasta 80-88°C, mientras que los peces e insectos más resistentes, pueden soportar hasta 50°C. Algunos microorganismos pueden soportar niveles muy bajos de temperatura (decenas de grados bajo cero). Las especies acuáticas presentan rangos de tolerancia a la temperatura más estrechos que las especies terrestres. La temperatura suele ser causa de zonificación y estratificación en los medios acuáticos y terrestres. Un fenómeno interesante es el aletargamiento o inhibición presentado por organismos sometidos a un nivel constante de temperatura. Parece existir un efecto estimulante en los cambios de temperatura dentro de los rangos de tolerancia.

La luz es un factor ambiental vital, que juega un papel fundamental en la fotosíntesis y en la vida de los animales. Desde el punto de vista ecológico, interesan la longitud de onda, así como la intensidad y duración de la luz, existiendo niveles de tolerancia máximos y mínimos en distintas especies.

⁸ En biología los mecanismos de control retroalimentado se denominan mecanismos homeostáticos.

El factor biológico de resistencia ambiental más importante lo constituyen las presiones de depredación y competencia, aún cuando ellas no son las únicas formas de interacción entre dos especies. La **competición** es una interacción en que dos o más organismos tratan de ganar control sobre un recurso limitado.

La **depredación** constituye una parte integral del funcionamiento de todo ecosistema, ya que los heterótrofos están obligados a comer para sobrevivir. En ecosistemas estables, el crecimiento y la depredación están equilibrados de tal modo que todas las especies tienen poblaciones viables. La población de un herbívoro está regulada tanto por la disponibilidad de alimento (hierbas), como por el tamaño y vitalidad de la población depredadora. La abundancia de hierbas depende de los factores que afectan la fotosíntesis (luz, agua, nutrientes), y de voracidad de la población de herbívoros. A su vez, la población de depredadores está regulada por el tamaño y vitalidad de la población de herbívoros.

La depredación también constituye una presión favorable en la selección natural de la especie presa, ya que los más aptos tienen mayores posibilidades de ejercer acciones defensivas más efectivas y sobrevivir.

Otras interacciones de interés entre especies incluyen:

Amensalismo: Una especie inhibe el crecimiento de otra, sin que ésta le afecte.

Parasitismo: Es un caso particular de depredación, en que el depredador es mucho más pequeño que la presa, y obtiene su alimento al consumir el tejido o el suministro de alimento de un huésped.

Comensalismo: Una especie saca provecho de un huésped sin que este último sea afectado.

Protocooperación: Ésta es una relación favorable entre dos especies, pero no es obligatoria. Por ejemplo, una especie puede servir de vehículo de transporte, mientras que la otra aporta capacidad defensiva frente a depredadores.

Mutualismo: Es otro tipo de interacción benéfica y necesaria para ambas partes. En muchos casos, existe una dependencia directa, donde ambos organismos deben crecer juntos para sobrevivir.

2.5) LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Tanto la estructura física como la composición química de la Tierra están en constante cambio. Las diferentes placas de la corteza terrestre se mueven en procesos a gran escala, extremadamente lentos, con tiempos característicos del orden de cientos de miles de años o más, cuyas manifestaciones actuales se traducen en erupciones volcánicas, formación de nuevos volcanes y terremotos. Por otra parte, los diferentes compuestos químicos que forman el planeta sufren reacciones químicas, cambios de fase y transporte de una región a otra. El flujo de materiales, entre los que se incluyen los componentes del protoplasma, tiene lugar a través de los diferentes comportamientos del ambiente físico y biológico, en rutas más o menos circulares denominados **ciclos biogeoquímicos**. La atmósfera, los océanos (parte de la hidrósfera) y la corteza terrestre son los principales compartimentos que sirven de reserva para los materiales esenciales para la vida en la Tierra. En dichos compartimentos, los diferentes elementos se encuentran en grandes cantidades (del orden de miles de millones de toneladas) y sus tiempos de residencia pueden ser de unos pocos días (ej. el agua en la atmósfera) hasta miles o millones de años (ej. los carbonatos en el fondo de los océanos).

El agua participa como vehículo de materia y energía, ya que sus propiedades químicas y termodinámicas le confieren un papel fundamental en los procesos naturales. Este compuesto está en continuo movimiento entre la atmósfera, los océanos y los continentes, permitiendo el transporte rápido de energía calórica y de compuestos químicos. El transporte de materiales entre la atmósfera y los océanos se basa en procesos de evaporación, precipitación, arrastre y depositación de polvos y aerosoles. Mecanismos físicos similares permiten el intercambio de materia entre la atmósfera y el suelo. Por su parte, los ríos transportan sólidos en suspensión y compuestos disueltos hacia el mar, donde se integran a los sedimentos aquellos compuestos insolubles. Los compuestos de la corteza se exponen al suelo en los levantamientos producidos por los terremotos u otros movimientos de tierra, mientras que las erupciones volcánicas aportan materiales que se encuentran en el manto terrestre.

Es importante recalcar aquí que la actividad biológica juega un papel fundamental en la dinamización de los ciclos biogeoquímicos. Como se verá en los párrafos siguientes, los microorganismos, las plantas y los seres heterótrofos participan activamente en los ciclos asociados al oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre y fósforo.

Dichos procesos naturales han ocurrido desde mucho antes de la aparición del hombre. La actividad humana puede causar cambios en la velocidad de algunos de estos procesos, dinamizando cambios desfavorables para su propia existencia. Por ejemplo, el incremento de las emisiones de CO₂ debido a la combustión de petróleo, gas, leña, carbón y otros combustibles, sumado a la disminución de la biomasa fotosintética, parece ser responsable del significativo aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Dentro del contexto de este trabajo, es importante conocer los ciclos biogeoquímicos más relevantes. A continuación se

presenta una breve descripción de los ciclos del agua, el oxígeno, el carbono, el nitrógeno y el azufre, ya que estas se encuentran mayoritariamente presentes en los seres vivos.

2.5.1) Ciclo Hidrológico

El agua tiene una importancia fundamental en el desarrollo de la vida en el planeta. Cubre el 70% de la superficie, y sus propiedades controlan las condiciones climáticas que hacen factible la vida. Es uno de los solventes más poderosos que existen, y es uno de los vehículos de transporte de materiales más importante, tanto dentro de los seres vivos, como en el entorno físico. Además, el agua posee un alto calor de vaporización (del orden de $2260 \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)}$) y calor específico ($4,2 \text{ (kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$), que la transforman en un vehículo de transporte de energía de importancia fundamental en el control climático terrestre.

Las fuerzas gravitacionales y la energía solar constituyen las principales fuerzas motrices del ciclo hidrológico. La gravedad afecta la circulación de los ríos y aguas subterráneas, mientras que el resto del ciclo hídrico, es determinado por la energía solar. La absorción de dicha energía genera evaporación de las aguas superficiales, tanto continentales como oceánicas. Además, una pequeña fracción de la energía solar incidente, genera los vientos y las corrientes, que ayudan a la circulación de la atmósfera y las masas de agua.

La energía absorbida a la forma de calor latente durante la evaporación, es liberada durante la condensación, por lo que estos flujos hídricos son también vehículos de transporte de energía desde una región a otra. El efecto neto de esta transferencia de energía es una reducción de las diferencias de temperatura entre las diferentes zonas de la Tierra.

Otro efecto adicional del ciclo hidrológico, deriva de la gran capacidad solvente del agua. La lluvia absorbe aquellos compuestos solubles presentes en la atmósfera, tales como: O_2 , N_2 , CO_2 y óxidos de S y N. Esto último puede incrementar significativamente la acidez de las lluvias. A su vez, la escorrentía debida a las precipitaciones, disuelve los compuestos solubles del suelo y las rocas, proceso que es facilitado a bajo pH. Como resultado de esto, la escorrentía que llega a los ríos, lagos y mares, es rica en compuestos disueltos, que luego pueden formar compuestos insolubles, y precipitar o sufrir nuevas transformaciones químicas.

Los aerosoles de agua de mar generados por acción del viento y las olas, son arrastrados por los vientos tierra adentro, donde son depositados por acción de las lluvias o la nieve o como deposición seca, representando una importante fuente de sodio y cloro.

Las tablas siguientes muestran las reservas de agua en la Tierra, así como los flujos anuales más importantes. Se observa que existe un flujo de agua neto desde los océanos a la tierra (equivalente a $46 \cdot 10^{12} \text{ m}^3/\text{año}$), el que retorna al mar vía los ríos y acuíferos subterráneos. El tiempo de residencia medio del agua en la atmósfera es del orden de 8 a 9 días, mientras que en el mar es del orden de 4000 años. Es importante considerar que el agua fresca, incluyendo aquella

existente en los polos, glaciares, acuíferos subterráneos, humedales, ríos, lagos y otras fuentes superficiales de agua dulce, corresponde al 2,69% del total existente en la Tierra.

TABLA 2.2: RESERVAS DE AGUA

LUGAR	10 ¹⁵ m ³	%
Océanos	1350	97,31
Polos y glaciares	30	2,16
Acuíferos subterráneos	7	0,50
Lagos, ríos, humedales y otros	0,4	0,029
Atmósfera	0,01	0,001

TABLA 2.3: FLUJOS HÍDRICOS

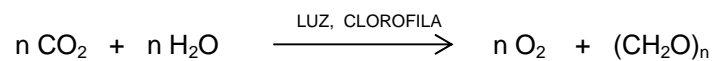
FLUJOS	10 ¹² m ³ / año	%
Precipitaciones sobre los océanos	410	79,15
Precipitaciones sobre los continentes	108	20,85
Total Precipitaciones	518	100,00
Evaporación en los océanos	456	88,03
Evapotranspiración (desde los continentes)	62	11,97
Total Evaporación	518	100,00

2.5.2) Ciclo del Oxígeno

El oxígeno se encuentra presente en todo el ámbito terrestre. Es un importante componente de la corteza terrestre, donde representa un 28,5% en peso, formando silicatos, carbonatos, fosfatos, sulfatos y óxidos metálicos, químicamente estables. En el sistema hidrológico forma parte de la molécula de agua y también está como O₂ disuelto. Finalmente, la atmósfera contiene un 23,2% en peso de oxígeno, principalmente a la forma de O₂.

El O₂, tanto atmosférico como disuelto en agua, es altamente reactivo, participando en los procesos de oxidación asociados a los ciclos geoquímicos del carbón, hidrógeno, nitrógeno, azufre y hierro.

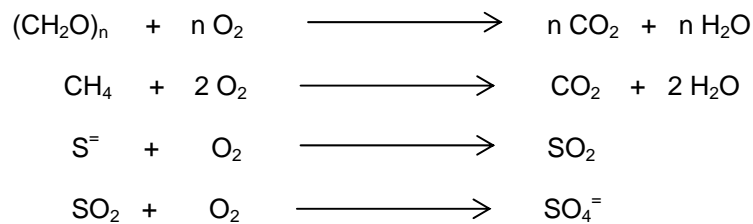
La mayor parte del O₂ es producido por acción de la **fotosíntesis** que ocurre en presencia de luz:



A través de este proceso, las plantas verdes y las algas absorben energía lumínica y la convierten en energía química, almacenada en los enlaces de los compuestos orgánicos que se forman. Por ejemplo, para generar un mol de glucosa mediante fotosíntesis, se requieren 2880 kJ a 25°C y 1 atm. Las plantas verdes contienen moléculas de clorofila que son capaces de absorber luz visible, principalmente en el espectro del rojo y el azul.

Adicionalmente, una pequeña cantidad de oxígeno se forma por fotodisociación del agua en las regiones superiores de la atmósfera, debido a la acción de los rayos ultravioleta (UV). La radiación UV también está involucrada en la conversión del O₂ a ozono (O₃), en la estratósfera. El ozono tiene una gran capacidad para absorber la letal radiación UV, impidiendo que ésta alcance la superficie terrestre.

El O₂ participa en todas las reacciones de **oxidación**, tanto aquellas que ocurren por procesos químicos espontáneos, como debido a la acción respiratoria de los organismos vivientes, por ejemplo:



Existe suficiente evidencia que demuestra que la concentración de O₂ en la atmósfera se ha mantenido constante por millones de años, lo que refleja un estricto equilibrio entre las tasas de consumo y de formación de O₂. Al parecer existen mecanismos de regulación de acción rápida, que permiten mantener el nivel de oxígeno a los niveles actuales. Dicho mecanismo de control retroalimentado, está ligado, probablemente, al ciclo del carbono y a la cantidad de materia orgánica que es incorporada a los sedimentos oceánicos. Este fascinante aspecto se discute más extensamente en la sección sobre la Teoría de Gaia.

2.5.3) Ciclo del Carbono

El 99% del carbono del planeta se encuentra presente en las rocas a la forma de carbonato (normalmente, como CaCO₃) o como carbono orgánico disperso. El 1% restante se encuentra presente en: la atmósfera, los seres vivos, los combustibles fósiles y compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos en agua. Los organismos vivientes están compuestos principalmente de agua y de una amplia gama de compuestos orgánicos.

El carbono acompaña estrechamente al ciclo del oxígeno en los procesos fotosintéticos y en los procesos de oxidación de materia orgánica, ya sea por la combustión o por actividad biológica.

El CO₂ generado por la oxidación de compuestos orgánicos se disuelve fácilmente

en agua. Más del 98% del CO₂ se encuentra disuelto en los océanos (como HCO₃⁻ y CO₃⁼), mientras que el 2% restante se mantiene en la atmósfera, donde a fines del siglo XX alcanzaba una concentración del orden de 350 ppm (mostrando un significativo incremento en los dos últimos siglos):



La proporción en que se encuentran estos compuestos depende fundamentalmente del pH de la solución. La mayoría de los océanos tiene un pH entre 8 y 8,3, y en promedio, cerca de 13% de la mezcla está como CO₃⁼. En las capas oceánicas superficiales, existe una gran actividad fotosintética, con un alto consumo de CO₂, por lo que la reacción tiende a desplazarse hacia la izquierda para restaurar el equilibrio químico. Por otra parte, en las profundidades marinas, existe una producción neta de CO₂ debido a la actividad respiratoria y a los procesos de oxidación de la materia orgánica muerta. Bajo estas condiciones, la reacción se mueve hacia la derecha, incrementando la concentración de CO₃⁼. Si el incremento de concentración del ion carbonato es significativo, y se excede el producto de solubilidad del CaCO₃ (K_{PS}= 4,47 10⁻⁸ M⁻¹), se producirá una mayor precipitación de CaCO₃, principal constituyente de las conchas marinas.

La actividad fotosintética mantiene un fino balance en el ciclo del carbono y del oxígeno. A través de la fotosíntesis se forman los compuestos orgánicos, utilizando CO₂ como fuente de carbono. Los productores primarios en el océano son las algas unicelulares a la deriva (llamadas fitoplancton), las que sirven de alimento al zooplancton. A su vez, ambos son el alimento de los organismos acuáticos superiores (necton y bentos). Así, el carbono se mueve continuamente desde la atmósfera hacia la cadena alimenticia, a través de la fotosíntesis, retornando a la atmósfera durante la respiración y oxidación de la materia orgánica muerta. Una pequeña parte de la materia orgánica se deposita en los sedimentos, junto con los carbonatos insolubles.

Las principales reservas de carbono y los flujos del ciclo se presentan en la Tabla siguiente:

TABLA 2.4: RESERVAS DE CARBONO

LUGAR	10 ¹² ton C	%
Rocas, inorgánico	26.000	76,37
Rocas, orgánico disperso	8.000	23,50
Agua, inorgánico y orgánico	38	0,11
Fósiles	4	0,01
Biomasa, total	2	-
Atmósfera, CO, CO ₂ , CH ₄	0,8	-

TABLA 2.5: FLUJOS DE CARBONO

FLUJO	10 ⁹ ton C / año
CO ₂ generado por respiración de organismos marinos	97
CO ₂ generado por oxidación de organismos muertos	25
CO ₂ generado por respiración de organismos terrestres	10
CO ₂ generado por combustión	6
CH ₄ generado anaeróbicamente	0,5
C fijado por fotosíntesis marina	100
C fijado por fotosíntesis terrestre	35
C fijado a sedimentos marinos, como carbonato	0,2

Cabe destacar que la acción microbiana anaeróbica sobre diversos sustratos orgánicos constituye otro vehículo de destrucción de material orgánico y transformación en carbono inorgánico. Dicha actividad biológica anaeróbica ocurre en los intestinos de los mamíferos, en los humedales, profundidades marinas y otras zonas anóxicas, contribuyendo a la generación de 500-1000 millones de toneladas de CH₄ anualmente, el que se oxida a CO₂ en la atmósfera. Se ha sugerido que este proceso juega un papel importante en los mecanismos biológicos que existen para la regulación del nivel de oxígeno en la atmósfera. Más aún, tanto el CO₂ como el CH₄ contribuyen en un 57% y 12% al efecto invernadero, respectivamente.

2.5.4) Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno a la forma de N₂ representa el 76% en peso de la atmósfera terrestre y constituye la principal reserva de nitrógeno en el planeta. Al contrario de otros elementos, el nitrógeno presente en el suelo proviene principalmente de la atmósfera. El N₂ tiene una baja reactividad química y sólo se oxida a altas temperaturas. El nitrógeno es un componente importante de los organismos vivos, principalmente como N³⁻, a la forma de grupo amino (R-NH₂) en los aminoácidos y proteínas. Desde el punto de vista bioquímico, pocos organismos pueden utilizar directamente el N₂ atmosférico. Sin embargo, existen varios puentes entre la comunidad biológica y el nitrógeno atmosférico. Las reacciones fotoquímicas en la atmósfera, las bacterias y algas fijadoras de nitrógeno del suelo y el mar, y las fábricas de fertilizantes químicos construidas por el hombre en el presente siglo, transforman el N₂ en formas utilizables para los seres vivos. Entre estos agentes, los microorganismos juegan un importante papel en las complejas transformaciones químicas que caracterizan el ciclo geoquímico del nitrógeno, particularmente, en los procesos de asimilación, fijación, desnitrificación, nitrificación y amonificación, tal como se describe a continuación.

El N₂ atmosférico es transformado en N³⁻ a través de la acción de microorganismos existentes tanto en el agua como en el suelo, en un proceso denominado **fijación del nitrógeno**. Existe una abundante comunidad de microorganismos capaces de fijar el N₂, entre ellas: bacterias aeróbicas (ej.

Azotobacter sp., *Thiobacillus sp.*, algas verde-azules), bacterias anaeróbicas (ej. *Clostridium sp.*, *Desulfovibrio sp.*, bacterias fototróficas), bacterias en asociación simbiótica con: nódulos de leguminosas (ej. *Rhizobium sp.*), líquenes (ej. cianobacterias), etc. Los avances recientes en las técnicas de detección de presencia de organismos fijadores de N_2 han permitido revelar que hay fijación biológica de nitrógeno en los estratos autótrofos y heterótrofos de los ecosistemas, y en las zonas aeróbicas y anaeróbicas de los suelos y sedimentos acuáticos. Sólo los microorganismos anucleados más primitivos (procariotas), tienen la capacidad de fijación de nitrógeno (algunos de los cuales aparecieron sobre la Tierra hace 1500 millones de años). Resulta interesante constatar la alta eficiencia de fijación de N_2 que caracteriza a aquellos sistemas con asociación simbiótica, en comparación con los organismos no fototróficos de existencia libre. Por ejemplo, la capacidad fijadora de las bacterias en asociación con los nódulos de las raíces de leguminosas está en el rango 50-900 (kg N fijado/hectárea/año), mientras que las especies libres (ej. *Clostridium sp.*, *Azotobacter sp.*) fijan menos de 1 (kg N/hectárea/año). Al parecer, el nódulo radicular de tales plantas protege a los microorganismos del exceso de oxígeno, el cual es inhibidor de la fijación, y les proporciona la energía química necesaria; y en retorno la planta obtiene una cantidad de nitrógeno fácilmente asimilable. Esta actividad simbiótica ilustra un fenómeno de cooperación mutua, muy común en los sistemas naturales.

La fijación de N_2 en los océanos es relativamente baja, siendo las algas verde-azules las responsables de la casi totalidad de la actividad fijadora. Se estima que una gran parte de la fijación marina, ocurre en los arrecifes de coral y en las áreas litorales, en asociación simbiótica con algunas plantas acuáticas.

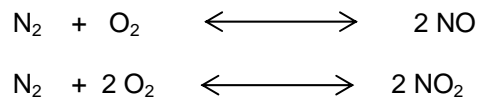
Las formas más comunes del nitrógeno del suelo que las plantas pueden utilizar directamente son el ion nitrito (NO_2^-), el ion nitrato (NO_3^-) y el ion amonio (NH_4^+). Estos compuestos del nitrógeno son asimilados por las plantas y entran en la cadena alimenticia heterotrófica, incorporándose en los procesos biológicos, transformándose en aminoácidos y proteínas. Cuando los compuestos orgánicos nitrogenados son degradados bioquímicamente, se forman compuestos inorgánicos (principalmente NH_3 / NH_4^+), los cuales son fácilmente asimilables por las plantas y por la mayoría de los microorganismos.

En presencia de oxígeno, un amplio grupo de procariotas que habitan en el suelo y las aguas dulces y marinas (ej. *Nitrosomonas sp.*, *Nitrobacter sp.*, *Nitrosococcus sp.*), obtienen su energía oxidando el NH_4^+ a través del proceso de **nitrificación**, produciendo nitrito y nitrato. El nitrato también es asimilado fácilmente por las plantas que lo vuelven a reducir a N^{3-} .

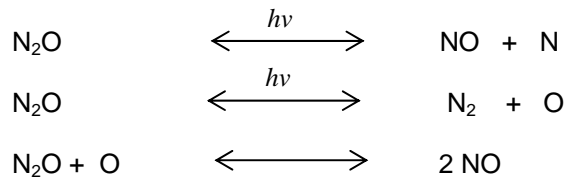
Muchos microorganismos poseen la capacidad de reducir los óxidos de N en condiciones anóxicas, donde dichos compuestos sustituyen al O_2 como aceptor terminal de electrones en la cadena respiratoria. Si la reducción continúa hasta la generación de gases de N_2 y N_2O , el proceso se denomina **desnitrificación**. Esta capacidad está difundida entre varios microorganismos que habitan en el suelo y el agua. Este proceso representa una vía a través de la cual el nitrógeno disponible en las aguas y el suelo, se pierde a la atmósfera. Estas pérdidas de N se suman a los óxidos de nitrógeno generados por la combustión de combustibles

fósiles, los que debido a su origen biológico, contienen N. Cabe destacar que más del 80% del nitrógeno que participa en las reacciones en la superficie terrestre y en los océanos, permanece reciclado y sólo el 20% se pierde a la atmósfera por denitrificación y evaporación. Es éste 20% el que se repone anualmente por fijación del N₂ atmosférico.

Además de estos procesos biológicos, el nitrógeno participa en reacciones químicas espontáneas que tienen lugar, principalmente, en la atmósfera. Aparte del N₂O suministrado a la atmósfera por las reacciones de desnitrificación y la combustión de materia orgánica nitrogenada, otros óxidos se generan por oxidación directa del N₂ a altas temperaturas (por ejemplo, debido a los relámpagos o durante la combustión de combustibles fósiles):



El N₂O es el más estable de los óxidos de nitrógeno y logra llegar a la estratósfera. Allí, la alta radiación UV es capaz de fotolizar dicha molécula y alrededor del 95% se transforma en N₂, mientras que el 5% pasa a NO. Este proceso ocurre a alturas superiores a 20 km. y las principales reacciones se pueden sintetizar:



El NO estratosférico es importante, ya que cataliza la descomposición del ozono en la alta estratósfera.

Finalmente, los óxidos gaseosos de nitrógeno, llamados comúnmente NO_x, sufren oxidación a nitrato, el cual es absorbido por el agua y cae a la superficie con la lluvia, reduciendo su pH.

Las principales reservas y flujos del ciclo de nitrógeno se muestran en las Tablas siguientes:

TABLA 2.6: RESERVAS DE NITRÓGENO

LUGAR	10 ⁹ ton N
Atmósfera, N ₂	3.800.000
Atmósfera, NO _x	1,30
Océano, en biomasa	0,50
Océano, en compuestos disueltos	300
Terrestre, en biomasa	3,50
Terrestre, total en sedimentos, orgánicos e inorgánicos	1.000.000

TABLA 2.7: FLUJOS DE NITRÓGENO

FLUJOS	10 ⁶ ton/año
NO _x a la atmósfera, desnitrificación	90
NO _x a la atmósfera, fuentes antrópicas	50
N ₂ a la atmósfera, desnitrificación	240
Deposición de NO ₃ ⁻ en tierra	70
Deposición de NO ₃ ⁻ en océanos	50
Fijación antrópica de N ₂ (fertilizantes sintéticos)	80
Fijación biológica de N ₂ en tierra	140
Fijación biológica de N ₂ en océanos	30
N fijado en sedimentos	10

2.5.5) Ciclo del Fósforo

Los compuestos de fósforo presentan, en general, baja solubilidad y volatilidad. La mayor reserva de fósforo se encuentra en las rocas y otros depósitos formados durante millones de años de evolución geológica. Dichos depósitos se han ido erosionando en forma gradual, liberando compuestos de fósforo, principalmente ortofosfatos (PO₄⁻³), hacia los ecosistemas. Una gran fracción de estos flujos de fosfato es lixiviada al mar, donde eventualmente se deposita en los sedimentos. Entre los compuestos inorgánicos típicos se encuentran: Ca₃(PO₄)₂, Al PO₄, Fe PO₄. Las reservas y flujos de fósforo en la naturaleza se presentan en las Tablas siguientes:

TABLA 2.8: RESERVAS DE FÓSFORO

LUGAR	10 ⁹ ton P
Fósforo en Suelos	200
Rocas de Fosfato	10-100
Fosfato en Océanos	120

TABLA 2.9: FLUJOS DE FÓSFORO

FLUJOS	10 ⁶ ton P / año
Fosfatos insolubles de ríos a océanos	20
Fosfatos solubles de ríos a océanos	1
Fósforo en partículas a la atmósfera	3,3
Fósforo en sedimentos marinos	22
Deposición de partículas sobre suelos	3,2
Deposición de partículas sobre océanos	1,4
Fósforo en aerosoles marinos	0,3

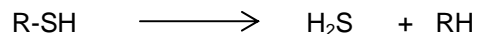
Como se puede ver, los flujos geoquímicos de este elemento, dependen de la transferencia de material suspendido desde los ríos al mar. No existen compuestos de fósforo en la composición de la atmósfera, por lo que ésta sólo participa como medio de transporte de partículas con contenido de fósforo, arrastradas por el viento.

El fósforo es un componente clave del protoplasma de los seres vivos. Tal como se menciona más adelante, el fósforo forma parte de las moléculas de ATP, ADP y AMP, que son fundamentales en la transferencia de energía celular, y de las moléculas de ADN y ARN, constituyentes del material genético de las células. Normalmente, el fósforo es el factor limitante en la fertilidad de los suelos y de los ecosistemas acuáticos. Su baja solubilidad limita su disponibilidad como nutriente.

En los lagos, los niveles de nitrato y de fosfato son bajos, constituyéndose en los nutrientes limitantes para el crecimiento de las algas fotosintéticas. Se requiere 1 átomo de fósforo por cada 12-20 átomos de nitrógeno, para sostener una actividad biológica balanceada. Las fuentes antrópicas de P provienen de los vertidos de efluentes domésticos e industriales. En particular, los altos consumos de detergentes fosfatados pueden generar eutrofización en aquellos cuerpos de agua donde el fósforo es el reactivo limitante.

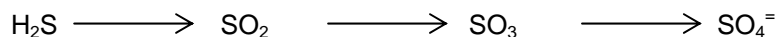
2.5.6) Ciclo del Azufre

A diferencia del nitrógeno, el azufre tiene su principal reserva en la corteza terrestre, con una pequeña pero importante fracción en la atmósfera. Sin embargo, existe una fuerte analogía entre el ciclo del azufre y aquél del nitrógeno, con respecto al papel jugado por los microorganismos. Ambos elementos están presentes en los seres vivos en su forma química más reducida (es decir, N^{-3} y S^{-2} , formando grupos amino e hidrosulfuro, respectivamente). El azufre es un importante constituyente secundario de las proteínas, debido a su habilidad para formar enlaces S-S, lo que permite formar estructuras proteicas en gran escala y de formas tridimensionales especiales. Cuando la materia orgánica se descompone, el azufre proteico se transforma en H_2S :



El H_2S se genera principalmente en ambientes terrestres y en marismas, donde prevalecen condiciones anóxicas. Además, muchas especies de fitoplancton marino son capaces de producir dimetil sulfuro $((CH_3)_2S)$ y H_2S a partir de la reducción de sulfatos presentes.

Ambos compuestos son volátiles y sufren una rápida oxidación espontánea en la atmósfera, donde se transforman en SO_2 y, eventualmente, en sulfato ($SO_4^{=}$):



La oxidación de los sulfuros también puede ocurrir en el suelo, los sedimentos y en medio acuático, a partir de procesos biológicos (ej.: bacterias tiobacilares).

La utilización del sulfato en las reacciones biológicas involucra un acoplamiento con el ciclo del carbono, donde el sulfato actúa como aceptor de electrones. El sulfato, al igual que el nitrato y el fosfato, son la principal forma química que es reducida por los organismos autótrofos e incorporada a las proteínas.

El principal compuesto de azufre en la atmósfera es el SO_2 , proveniente de fuentes naturales y antrópicas. El dióxido de azufre es generado naturalmente durante las erupciones volcánicas y durante la combustión espontánea de biomasa forestal. Las principales fuentes antrópicas son los procesos de combustión de combustibles fósiles y la refinación de minerales sulfurados. Ello constituye un flujo que permite reciclar el azufre desde las profundidades de la tierra a la atmósfera y su eventual depositación como sulfato.

TABLA 2.10: RESERVAS DE AZUFRE

LUGAR	10^9 ton S
Rocas Sedimentarias	8.000.000
Atmósfera	0,004

TABLA 2.11: FLUJO DE AZUFRE

FLUJO	10^6 ton S/año
SO_2 a la atmósfera, origen antrópico	78
SO_2 a la atmósfera, origen natural	10
Sulfuros volátiles a la atmósfera	16
Sulfato a la atmósfera, fuente oceánica	140
Precipitación de sulfato atmosférico sobre los océanos	160
Precipitación de sulfato atmosférico sobre tierra	84

2.6) NUEVOS CONCEPTOS SOBRE LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS: LA HIPÓTESIS DE GAIA

En las secciones anteriores ha quedado de manifiesto que los seres vivos participan activamente de los ciclos geoquímicos. La naturaleza física y química de la materia inerte está en constante cambio gracias a la acción de organismos que devuelven al medio nuevos compuestos y fuentes de energía. Un buen ejemplo de como los seres vivos modifican el medio físico, son los atolones de Coral del Pacífico, donde la actividad de animales y vegetales resulta en la formación de islas enormes, a partir de los materiales disueltos en el mar.

En las últimas décadas, se ha planteado que las condiciones en la Tierra son apropiadas para la vida, debido a que los mismos seres vivos han tenido la capacidad de regular tales condiciones a los niveles óptimos para asegurar el desarrollo de la vida sobre el planeta. A comienzos de los años 70, el científico

británico James Lovelock y otros colaboradores, entre los que destaca la microbióloga Lynn Margulis, desarrolló tal hipótesis motivado por la intrigante constancia de la composición de la atmósfera terrestre, a pesar de las diferentes perturbaciones en los flujos energéticos y materiales que han ocurrido en los millones de años transcurridos. El hecho de que la composición atmosférica y el medio físico de la Tierra sean bastante diferentes de las condiciones de los otros planetas del sistema solar, condujo al planteamiento que sostiene que los seres vivos han evolucionado con el medio físico para lograr un complejo sistema de control que mantiene las condiciones sobre la tierra favorables para la vida. Tal hipótesis se denomina **Hipótesis de Gaia** (diosa griega de la Tierra).

Lovelock estudió la composición química de la atmósfera en sus aspectos químicos y termodinámicos. Concluyó que, para mantener constante el metano atmosférico (cuya concentración es del orden de 1,7 ppm) ante la presencia de 21% de O₂, se requiere un flujo de 10⁹ ton CH₄/año y un flujo de O₂ de 4×10⁹ ton O₂/año para oxidar el metano. Tales flujos son sólo posibles gracias a la actividad de los microorganismos. De acuerdo a estos científicos, casi todos los ciclos biogeoquímicos tienen un componente biológico fundamental. La participación de los microorganismos es parte integral de los mecanismos que regulan las condiciones de temperatura y pH que hay en la superficie terrestre. Según Lovelock, la continua actividad coordinada de las plantas y microorganismos permite reducir las fluctuaciones en composición, pH y temperatura que se producirían en ausencia de sistemas vivos altamente organizados.

Resulta interesante comparar las condiciones atmosféricas y de temperatura de Marte, Venus, la Tierra y una Tierra hipotética sin vida:

TABLA 2.12: COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES

COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA	MARTE	VENUS	TIERRA SIN VIDA (Hipotética)	TIERRA (Actual)
O ₂ en atmósfera	0,13%	trazas	trazas	21%
N ₂ en atmósfera	2,7%	1,9%	1,9%	79%
CO ₂ en atmósfera	95%	98%	98%	0,03%
Temperatura superficial °C	- 53	477	240-340	13

Se observa que la atmósfera de la Tierra inerte sería similar a la de Marte y Venus, con trazas de oxígeno. Más aún, las simulaciones demuestran que en esa Tierra inerte, el nitrógeno habría desaparecido de los mares, mientras que el metano, el hidrógeno y el amoníaco desaparecerían rápidamente. Las condiciones de la Tierra sin vida fueron estimadas de acuerdo al estado de equilibrio termodinámico que se lograría sin la intervención de los procesos biológicos.

En la Tierra viviente, tanto la atmósfera, como el suelo y los océanos, tienen composiciones químicas muy lejanas a las condiciones de equilibrio. En la

atmósfera coexisten compuestos altamente oxidantes como el O_2 y el CO , con compuestos altamente reductores como el CH_4 , el H_2 y el NH_3 , y compuestos de baja reactividad como el CO_2 y el N_2 . Los gases oxidantes y los reductores tienden a reaccionar rápidamente entre sí, de forma muy enérgica. La presencia de los procesos biológicos permite mantener una situación de estado estacionario, lejano de las condiciones de equilibrio termodinámico. En otras palabras, la biósfera gasta la energía necesaria para mantener el sistema Tierra en una situación altamente inestable, lejos de los valores esperados del equilibrio químico. Quienes sostienen la Hipótesis de Gaia concluyen que la atmósfera de la Tierra no llegó a su composición actual gracias a la interacción de procesos físicos y químicos. Muy por el contrario, desde un principio los organismos desempeñaron un papel determinante en el desarrollo y regulación de un ambiente geoquímico favorable.

Del estudio de los diferentes procesos biogeoquímicos y del rol de la vida en mantener las condiciones estacionarias, se concluye que:

El entorno de la superficie de la Tierra se puede considerar como un sistema dinámico, protegido contra las perturbaciones por eficaces mecanismos de retroalimentación.

Frente a esta hipótesis, surge entonces la pregunta:

¿Cuál es la función de cada gas en la atmósfera o de cada componente en el mar?

Las respuestas fluyen en la misma dirección de aquella que se obtendría de la pregunta: ¿Cuál es la función de la hemoglobina o de la insulina en la sangre?.

Lovelock plantea que el O_2 es el gas dominante, aunque no sea el más abundante, y establece el potencial químico del planeta. Hace posible la combustión y las reacciones de oxidación fundamentales para sostener los procesos vivientes. ¿Porqué este gas tan importante se ha mantenido a un nivel de 21% de la atmósfera, prácticamente constante por millones de años? ¿Está regulado por algún sistema cibernético? ¿Qué factores han determinado que el punto de referencia al cual se debe mantener es 21%?

Durante varios cientos de millones de años, el nivel de O_2 debe haber sido bastante cercano al nivel actual; de otra manera, los animales e insectos voladores más grandes, no habrían podido existir. Andrew Watson de la U. de Reading, Inglaterra, demostró empíricamente que una concentración de O_2 sobre 25% en la atmósfera habría significado la combustión espontánea de toda la biomasa forestal del planeta, ante la mínima chispa volcánica. Según Watson, la probabilidad de incendios forestales depende críticamente de la concentración de O_2 , y un simple aumento de 1% en su concentración atmosférica incrementa la probabilidad de incendios espontáneos al 60%. A un nivel de 25% de O_2 , hasta el detritus húmedo de un suelo tropical se incendiaría completamente con un relámpago. Bajo esas condiciones, una vez en llamas, las selvas se quemarían totalmente, tal como se quemaría toda la vegetación y material orgánico sobre la

superficie terrestre. El nivel actual de 21%, parece representar un saludable equilibrio entre el riesgo y el beneficio. Los incendios ocurren con una frecuencia aceptable frente a las ventajas que ofrece una energía de alto potencial. El metano parece jugar un papel importante en el proceso de regulación del nivel de O_2 en el aire, y su generación y oxidación proceden con suficiente rapidez, como para ser parte de un circuito de retroalimentación en el sistema de regulación del oxígeno. Tanto la generación de O_2 como de CH_4 son debidas, principalmente, a la acción de organismos vivos.

Otro aspecto interesante que la Hipótesis de Gaia ha enfrentado se refiere al control del clima en la Tierra. Se sabe que, desde los orígenes de nuestro planeta, el Sol se está calentando exponencialmente y lo seguirá haciendo por millones de años más. Sin embargo, la velocidad de aumento de la producción de energía solar es tal que ésta ha aumentado entre 30 y 50% desde que aparecieron las primeras formas de vida sobre la Tierra. Las estrellas tienen la propiedad de incrementar su producción de calor y luz, a medida que envejecen. Obviamente, el clima al inicio de la vida tenía que haber sido apropiado para el desarrollo de ésta, ni glacial, ni ardiente. Más aún, todo parece indicar que la temperatura de la superficie de la Tierra ha permanecido increíblemente constante desde tiempos remotos, cuando aparecieron las primeras formas de vida. Un aumento del 30% de la radiación solar habría resultado en una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Si la velocidad actual de aumento de la producción solar ha tenido lugar desde el comienzo de la vida ¿Porqué no estamos hirviendo ahora? Se ha propuesto que en tiempos remotos, la joven Tierra tenía suficiente amoníaco capaz de absorber la radiación solar infrarroja, actuando como una manta que mantenía caliente el planeta a pesar de que el Sol estaba más frío que hoy. Otros plantean que el alto contenido de CO_2 atmosférico en aquellos tiempos remotos tendría un efecto de calentamiento similar. El clima de la Tierra se encuentra en un estado estacionario, entre dos regímenes extremos: uno glacial, el otro hirviendo, y sin embargo, la temperatura permanece casi constante. ¿No es aquello una prueba de que los microorganismos juegan un papel regulador al actuar sobre la composición de los gases trazas de la atmósfera (es decir, CO_2 , NH_3 , N_2O , CH_4) para mantener el balance térmico, a pesar de los cambios experimentados en la producción de energía solar?.

La Hipótesis de Gaia, considera el entorno físico y la biósfera como sistemas altamente integrados.

El ser humano tiene una reciente aparición en este escenario, pero su impacto sobre el entorno físico ha sido significativo. Somos actualmente más de 5 mil millones de individuos, junto a una plétora de especies subordinadas, que conforman los ganados y cultivos que requerimos para sobrevivir. Ello implica un creciente consumo de los recursos materiales y energéticos de la Tierra. Estamos incidiendo directamente en los ciclos biogeoquímicos, tal vez con impactos a nivel global, como lo sería la degradación de la capa de ozono y el incremento de la concentración de los gases invernadero. Si el impacto de la actividad humana sigue creciendo en intensidad y profundidad, se pueden generar nuevos fenómenos que minimicen el cambio, y se logre un nuevo nivel estacionario, cuyas condiciones ambientales podrían ser inapropiadas para la supervivencia del ser

humano.

La capacidad de autorregulación de la Tierra se demuestra al considerar que, aproximadamente cada 100 millones de años, ella recibe el impacto de enormes cuerpos celestes viajando a 70.000 km/h. La energía cinética de esos cuerpos es equivalente a la detonación de una veintena de bombas atómicas (similares a aquella lanzada en Hiroshima) por cada kilómetro cuadrado, si ella se distribuyera uniformemente por toda la Tierra. Se cree que hace 65 millones de años, uno de estos impactos causó la extinción de más del 60% de las especies que habitaban el planeta. Y sin embargo, el desarrollo de la vida continuó, amparado en las simples bacterias que siguen ordenando exitosamente la atmósfera terrestre, como lo han hecho por casi 2 mil millones de años. La Hipótesis de Gaia implica que la Tierra es un sistema cibernético natural, y debemos preservar los controles que permiten a la biósfera mantener condiciones ambientales estacionarias.

Por lo tanto, además de esforzarnos por reducir nuestro impacto sobre los ciclos biogeoquímicos, minimizando las emisiones de SO_2 , NO_x , CO_2 , CFC y otros contaminantes, debemos preservar la integridad del sistema de control regulatorio que hace posible la vida sobre la Tierra. Para ello, debemos descubrir cuales son los componentes que constituyen tal sistema de regulación planetaria. Un mamífero puede seguir viviendo si se le extirpa una mano, un brazo o unos cuantos dientes, pero morirá instantáneamente si se le extirpa el corazón, el cerebro, u otro órgano vital.

Tendremos que esperar que los avances en las ciencias fundamentales y aplicadas permitirán en un plazo no muy lejano, responder a las preguntas que nacen naturalmente de la hipótesis Gaia:

- 1.- ¿Cuáles son los órganos vitales de nuestra Tierra?
- 2.- ¿Cuáles son los sensores que permiten detectar las variaciones de temperatura y composición química en la atmósfera, las aguas y el suelo?
- 3.- ¿Cuáles son los mecanismos de transmisión de esta información a nivel planetario?, etc.

Para quienes deseen profundizar este tema, recomiendo el excelente texto de L.E. Joseph "GAIA: La Tierra Viviente", donde se presentan en forma sencilla, pero rigurosa, las recientes contribuciones en torno a esta interesante hipótesis. Obviamente, la publicación original de J. Lovelock es una lectura obligada.

En las secciones anteriores, ha quedado claramente demostrada la importancia del mundo microbiológico en el funcionamiento de la biósfera. Es el momento de hacer una pausa y revisar algunos conceptos de microbiología. En la próxima sección se resumirán aquellos fundamentos que nos permitan entender los procesos biológicos, dentro del contexto de la ingeniería ambiental.