

MÓDULO INTRODUCTORIO: NOCIONES DE ECOLOGÍA Y TOXICOLOGÍA AMBIENTAL CONTENIDOS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | <u>GENERALIDADES.....</u> | 1 |
| 2 | <u>CONTAMINACIÓN Y CONTAMINANTES.....</u> | 2 |
| 2.1 | CONCEPTO DE CONTAMINACIÓN..... | 2 |
| 2.2 | ALGUNAS POSIBLES CLASIFICACIONES DE AGENTES CONTAMINANTES | 3 |
| 2.3 | PROCESOS CONTAMINANTES | 5 |
| 3 | <u>ECOSISTEMAS.....</u> | 6 |
| 3.1 | CONCEPTO DE ECOSISTEMA | 6 |
| 3.2 | BIOCENOSIS | 10 |
| 3.3 | FACTORES AMBIENTALES POTENCIALMENTE LIMITANTES..... | 23 |
| 3.4 | FLUJO DE ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS | 45 |
| 3.5 | CICLOS BIOGEOQUÍMICOS | 51 |
| 4 | <u>CONCEPTOS DE TOXICOLOGÍA AMBIENTAL.....</u> | 58 |
| 4.1 | DOSIS..... | 58 |
| 4.2 | VÍAS DE INGRESO DE CONTAMINANTES QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS AL ORGANISMO..... | 59 |
| 4.3 | PRINCIPALES EFECTOS TÓXICOS | 60 |
| 4.4 | INTERACCIÓN DE AGENTES TÓXICOS..... | 63 |
| 4.5 | RESPUESTAS POBLACIONALES ANTE AGENTES TÓXICOS | 64 |
| 4.6 | ALGUNOS PARÁMETROS ECOTOXICOLÓGICOS | 64 |
| 4.7 | UNIDADES DE TOXICIDAD (UT) | 66 |
| 5 | <u>PELIGROSIDAD Y RIESGO DE AGENTES TÓXICOS.....</u> | 66 |
| 5.1 | CRITERIOS DE RIESGO..... | 67 |
| 5.2 | CRITERIOS DE PELIGROSIDAD | 67 |
| | <u>REFERENCIAS, BIBLIOGRAFÍA</u> | 70 |

1 Generalidades

En una concepción anterior a los años '70, la idea de "ambiente" se refería a lo (aparentemente) inanimado, es decir, lo que hoy podría designarse como *medio físico*. Entre los principales

componentes del medio físico, cabe mencionar la atmósfera (la envolvente gaseosa que rodea al planeta), la hidrósfera (el conjunto de las aguas presentes en el planeta) y la litósfera (la envolvente sólida exterior del planeta, cuya porción superficial se designa como *corteza terrestre*). Cada uno de estos componentes está sólo parcialmente en contacto con la vida presente en la Tierra.

A medida que el foco de atención fue centrándose en los seres vivos, cobró fuerza el concepto de *biósfera*, entendido o como conjunto de medios en los que se desarrollan los seres vivos (RAE, 23ª Edición) o como un gran sistema biológico o *biosistema* (el mayor de cuantos se pueden considerar como tales), que comprende la totalidad de los organismos vivos del planeta, las partes de la atmósfera, la hidrósfera y la litósfera en las que se desarrollan, y las interrelaciones de los seres vivos con el medio. De hecho, son estas interrelaciones las que permiten que surjan nuevas propiedades que no se dan cuando las partes se consideran en forma independiente unas de otras, y son las que hacen que ese conjunto de partes, que podrían verse como entidades independientes, funcionen efectivamente como un sistema. Esas propiedades que surgen a partir de la *interacción* entre las partes se designan como *propiedades emergentes*; su existencia diferencia un *comportamiento sistémico* de una mera adición de propiedades individuales de las partes. Los grandes *biosistemas* regionales, que en general se caracterizan por un tipo de vegetación dominante o por otro aspecto notable del paisaje, se designan como *biomas* o *paisajes biogeográficos* (por ejemplo, pradera templada, bosque de coníferas, selva tropical, tundra ártica, desierto, etc.).

Cuando el hombre reconoce la necesidad de diferenciar su capacidad de modificar el entorno en el que habita en tanto *animal cultural*, fruto de la llamada “doble herencia” (la *herencia genética* y la *herencia cultural* que, sumadas a la capacidad de aprendizaje colaborativo y acumulativo a través del tiempo, hacen del hombre un animal diferente a los demás), surge el concepto de “antropósfera” (neologismo aún no reconocido por la RAE). Si el concepto de biósfera encierra una idea sistémica y considera las interrelaciones entre los seres vivos y el medio en el que viven, el concepto de *antropósfera* tiene además una *dimensión histórica* implícita, que hace que la evolución de estas interrelaciones a lo largo del tiempo interese al punto de poder condicionar sus futuras modificaciones.

En consecuencia, y luego de esta breve introducción, resulta claro que en los temas ambientales *todo está relacionado con todo*, y no sólo en un cierto instante sino también a través del tiempo.

2 Contaminación y Contaminantes

... los estudios sobre la extinción de especies o los niveles de contaminación que proliferaron desde la década de 1960, alertaban sobre una creciente problemática. La vieja imagen de una Naturaleza agresiva y todopoderosa, poco a poco, dio paso a la de una Naturaleza frágil y delicada. La Naturaleza como salvaje desaparece, y lo ‘natural’ adquiere méritos de ser la situación a la que se desea regresar. (Gudynas 2004, en: Elissalde, 2017)

2.1 Concepto de contaminación

Son muchas y muy variadas las definiciones de *contaminación* que pueden darse. La que se presenta a continuación corresponde a la toxicóloga mexicana contemporánea Dra. Lilia Albert (1997):

*Se designa como **contaminación** a la introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes o sustratos a los que no pertenecen o en cantidades superiores a las propias*

de dichos sustratos, por un tiempo suficiente y bajo condiciones tales que sean capaces de interferir con la salud y la comodidad de las personas, dañar los recursos naturales o alterar el equilibrio ecológico de la zona.

Es conveniente remarcar algunos puntos que considera esta definición:

- Los agentes contaminantes pueden ser químicos, físicos o biológicos.
- Tanto la introducción de contaminantes como la presencia de estos puede entenderse, según el caso, como contaminación.
- Un agente se constituye en contaminante cuando está en un ámbito (un sustrato) inadecuado, o cuando aun estando en un ámbito (un sustrato) esperable se presenta en cantidades excesivas.
- Un agente se reconoce como contaminante cuando además de estar en cantidades suficientes para generar efectos adversos, su presencia se prolonga durante el tiempo necesario para que estos ocurran.
- Los efectos de un agente contaminante no son solo interferencias o daños a la salud humana. La interferencia con la comodidad o bienestar de las personas, el daño a los recursos naturales o la alteración a los ecosistemas aun cuando éstos no tengan un valor económico inmediato –o sea, no estén considerados como “recursos”- son también efectos o manifestaciones de un proceso de contaminación.

2.2 Algunas posibles clasificaciones de agentes contaminantes

Siguiendo con la línea de análisis de Albert (1997), a continuación, se presentan algunas posibles clasificaciones de contaminantes ambientales, de acuerdo con su naturaleza, su abundancia, su origen y los procesos que los generan.

2.2.1 Clasificación según su naturaleza

De acuerdo con su naturaleza, se puede hablar de contaminantes físicos, químicos o biológicos.

Los **contaminantes químicos**, que pueden presentarse en distintos estados físicos, pueden ser sustancias orgánicas o inorgánicas. Suelen tener que ver con desequilibrios o modificaciones en los ciclos biogeoquímicos naturales. Como ejemplo de sustancias orgánicas que pueden ser contaminantes cabe mencionar a las toxinas que producen algunos seres vivos, como la microcistina liberada por algunas cianobacterias; en cuanto a contaminantes inorgánicos, los metales constituyen los ejemplos principales de la toxicología ambiental.

Dentro de los **contaminantes físicos** se engloban formas de energía como calor, ruido, vibraciones y radiaciones.

Los **contaminantes biológicos** son seres vivos -en general microscópicos, como bacterias, virus, algas, protozoarios, entre otros- que o no están en su sustrato o que, estando en él, se presentan en cantidades que exceden a las naturales. Cuando se trata de microorganismos vinculados al ciclo fecal-oral, suelen asociarse con falencias de higiene o de saneamiento básico.

2.2.2 Clasificación según su abundancia

Se designan como **microcontaminantes** a productos muy tóxicos que suelen encontrarse en el ambiente en cantidades y concentraciones pequeñas.

Se designan como **macrocontaminantes** a productos poco tóxicos por acción directa pero que, debido a su abundancia, pueden producir consecuencias importantes al perturbar los ciclos biogeoquímicos naturales. Entre ellos también se cuentan algunos contaminantes atmosféricos que pueden afectar la salud de las personas.

2.2.3 Clasificación según su origen

Los contaminantes pueden ser *naturales* o creados por el hombre (*xenobióticos* o *antropogénicos*), y a su vez, pueden encontrarse en circunstancias diferentes.

Los **contaminantes naturales** pueden encontrarse **en su sustrato**, pero en cantidades mayores a las que se consideran inofensivas para causar alguno de los efectos que se entienden como contaminación (por ejemplo, el CO₂ en la atmósfera); o **en un sustrato diferente al suyo**, como por ejemplo los metales que aparecen en aguas superficiales provenientes del vertido de efluentes industriales.

Los **contaminantes xenobióticos** han sido creados por el hombre; no existían antes en la Naturaleza. En esta categoría están las moléculas sintetizadas con fines diversos, proceso este que se aceleró y magnificó a lo largo del siglo XX. Entre los casos más conocidos cabe mencionar los polímeros que dan origen a los plásticos o los compuestos clorofluorocarbonados (CFC¹), creados por el hombre en busca de sustancias que fueran químicamente inactivas. Pese a ser efectivamente inactivos y a su excelente desempeño como refrigerantes y propelentes, su rol protagónico en el agotamiento de la capa de ozono estratosférico es incuestionable; lamentablemente, se determinó en forma tardía.

2.2.4 Clasificación según el tipo de procesos en que se originan

Los agentes naturales pueden resultar contaminantes debido a procesos naturales o antropogénicos (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Contaminantes, procesos contaminantes (adaptada de Albert, 1997)

| Origen de los contaminantes | Proceso Contaminante | |
|-----------------------------|--------------------------------|--|
| | Natural | Antropogénico |
| Natural | Bacterias, hongos, radiaciones | Pb, Hg, CO ₂ , calor, radiaciones |
| Xenobiótico | No existen | CFC ¹ , DDT ² , PCB ³ , detergentes |

En el primer caso están los materiales dispersados en una erupción volcánica o en un incendio forestal espontáneo; en el segundo, los productos de la combustión en motores o el ruido del tránsito. Por su propia definición, los contaminantes xenobióticos sólo pueden asociarse con procesos antropogénicos.

¹ Los compuestos clorofluorocarbonados o clorofluorocarbonos (CFC) son moléculas que se sintetizaron hacia la década de 1930, con el objetivo de lograr compuestos muy estables para su uso como refrigerantes y propelentes.

² DDT = Dicloro Difenil Tricloroetano, plaguicida organoclorado de amplio espectro que actualmente está prohibido en casi todo el mundo. Forma parte de "la docena sucia", el conjunto de Contaminantes Orgánicos Persistentes COP contra los que se tomaron acciones restrictivas desde hace más tiempo.

³ PCB = Policloruros de bifenilo, aceites dieléctricos empleados en grandes transformadores, prohibidos en la década de 1980.

Es el caso del DDT en el ambiente o de aditivos sintéticos que se emplean en la fabricación / procesamiento de alimentos.

2.3 Procesos contaminantes

Los *procesos de contaminación*⁴ pueden ser tanto **naturales** como **antropogénicos**. Si bien en la naturaleza ocurren procesos o episodios contaminantes (por ejemplo: emisión de sustancias en erupciones volcánicas), en general hay –como es razonable– una preocupación mucho mayor por los procesos de contaminación originados por el hombre y por sus actividades.

Los *sustratos* que pueden verse afectados por procesos contaminantes suelen designarse como “*ambientes de la contaminación*”. Incluyen aire, agua, suelos y alimentos.

Los **procesos antropogénicos** que conducen a la presencia de contaminantes en el ambiente son muy variados. Pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: actividades productivas, actividades no productivas, procesos sociales y patrones culturales.

Dentro de las **actividades productivas** cabe citar no sólo a las actividades industriales, sino también a las explotaciones agrícolas, ganaderas, silvícolas, mineras y a la generación de energía.

Como **actividades no productivas** con potencial contaminante, sin dudas el transporte ocupa un sitio relevante, tanto si se habla de transporte público como de locomoción privada. También en este punto se incluyen **servicios** de distinta naturaleza, como por ejemplo comunicaciones, servicios de salud, etc. (muchos de ellos consumen energía, generan emisiones sólidas, líquidas o gaseosas, o en su operación ocurre la generación de ruido, vibraciones o campos electromagnéticos). Las tareas del hogar son también susceptibles de emitir contaminantes diversos (biocidas, detergentes, etc.).

Los **procesos sociales** que tienen que ver con el crecimiento demográfico, movimientos migratorios que generan crecimiento no planificado de ciudades o la creación de nuevas urbanizaciones, tienen un importante potencial de generar o potenciar procesos de contaminación. A modo de ejemplo, el incremento de la población mundial conduce a la necesidad de incrementar la producción de alimentos y con ello, al empleo de técnicas y productos que pueden ser considerados como contaminantes (por ejemplo, en ciertas condiciones, los fertilizantes y biocidas de uso intensivo pueden devenir en contaminantes ambientales). El crecimiento de las ciudades fuera de una cierta escala conduce a problemas en la prestación de servicios y en la calidad de vida de la población considerada desde un punto de vista amplio, lo que ciertamente puede dar lugar a procesos de contaminación ambiental. Como tercer ejemplo, generar una nueva urbanización produce importantes modificaciones en el entorno y el funcionamiento de la misma tiene asociada la generación de residuos líquidos, sólidos y gaseosos; de las prácticas que se sigan para su manejo y disposición final dependerá el resultado en materia de calidad ambiental.

Entre los **patrones culturales** que más tienen que ver con los procesos de contaminación se cuentan la economía de consumo –que promueve el *úselo y tírelo*, lo que implica mucho más que generar mayor cantidad de residuos a causa del descarte de bienes que deben ser sustituidos: se requiere materia prima y energía para fabricar nuevos bienes que sustituyan a los descartados–, actualmente

⁴Al referirse a ellos como *procesos*, se busca dar una idea explícita de la importancia del factor temporal.

en retroceso gracias al avance de conceptos como la sostenibilidad o la economía circular; las aplicaciones de diferentes sustancias o materiales a determinados fines –por ejemplo, la omnipresencia de los materiales plásticos en la vida cotidiana actual, el uso generalizado de productos sintéticos en la indumentaria, etc.-; el tabaquismo; la drogadicción, que genera pérdida de valores como el sentido de pertenencia, lo que lleva a exacerbar las diferentes formas de contaminación.

3 Ecosistemas

3.1 Concepto de ecosistema

3.1.1 Definición y componentes de un ecosistema

El **ecosistema** es la unidad de trabajo de la **ecología**, disciplina derivada de la biología que estudia las interrelaciones entre los elementos bióticos y abióticos del entorno en que se desarrollan los seres vivos. Los temas ecológicos han sido motivo de preocupación ya desde la Antigüedad, ni bien se ha comprendido la trascendencia de los delicados equilibrios dinámicos de los **sistemas biológicos** en relación a la preservación de la Vida en sus diferentes manifestaciones. Aunque hay muchas definiciones posibles, una de las más “clásicas” es la de E. Odum (Figuras 3.1.1 y 3.1.2):

Un ecosistema es un sistema biótico que incluye todos los organismos que funcionan juntos en un área determinada, interactuando con el medio físico de tal manera que un flujo de energía conduzca a la formación de estructuras bióticas claramente definidas y a que ocurran ciclos de materiales entre las partes vivas y no vivas.

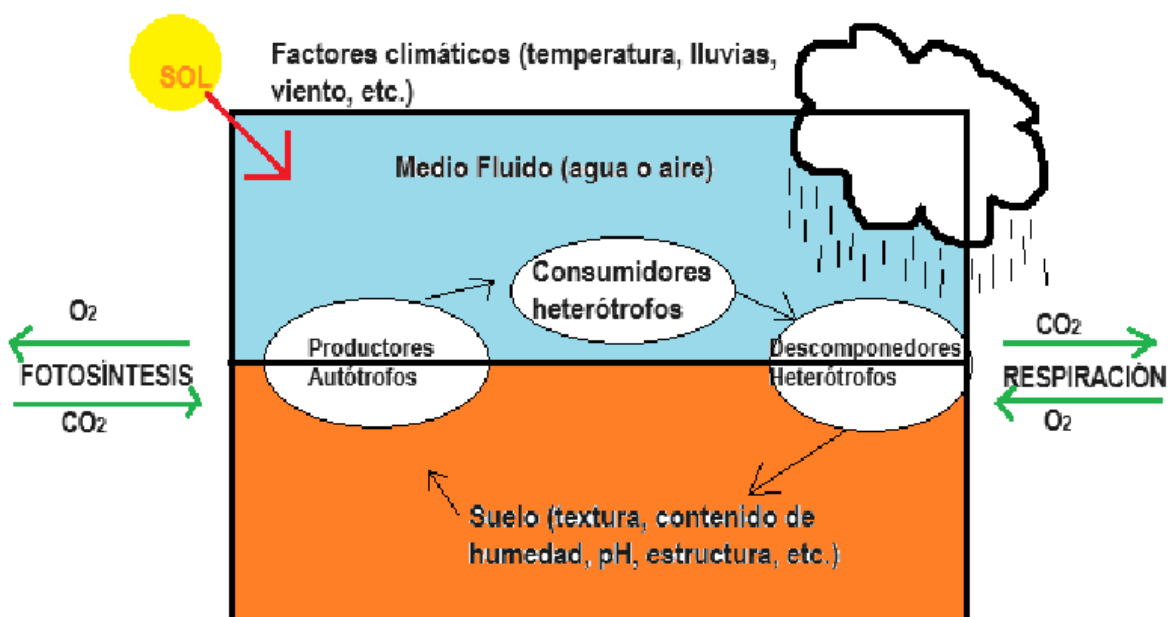


Figura 3.1.1. Componentes de un ecosistema (elaboración propia)

La **comunidad biótica** incluye al grupo de seres vivos que viven en una cierta zona; incluye individuos de diferentes especies. El conjunto de individuos de una misma especie constituye la **población** de esa especie allí presente. La comunidad biótica o biocenosis es, entonces, el conjunto de poblaciones presentes en una zona.

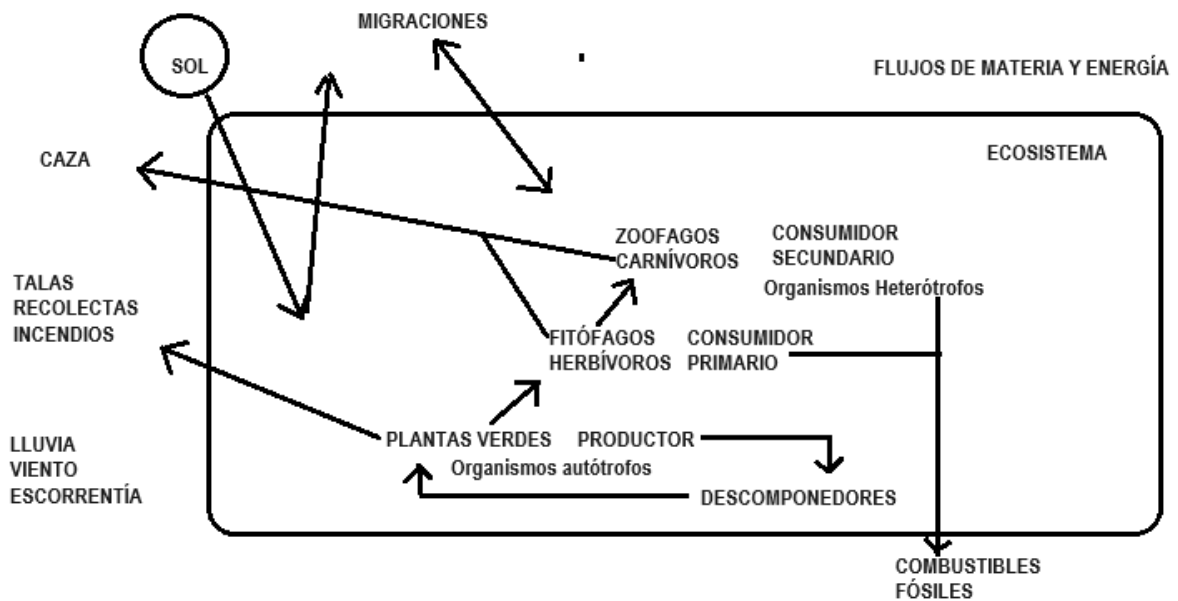


Figura 3.1.2. Componentes de un ecosistema terrestre (elaboración propia)

Un ecosistema es un sistema abierto: hay intercambio de energía, materia orgánica e inorgánica con el exterior. Por lo tanto, al definir un ecosistema, quedan definidos sus ambientes de entrada y de salida (Figura 3.1.3). En el ambiente de entrada debe considerarse, por ejemplo, la energía solar, aunque también pueden participar organismos, materiales y otras fuentes de energía. En el ambiente de salida aparecerán flujos de energía y eventualmente materiales y organismos.

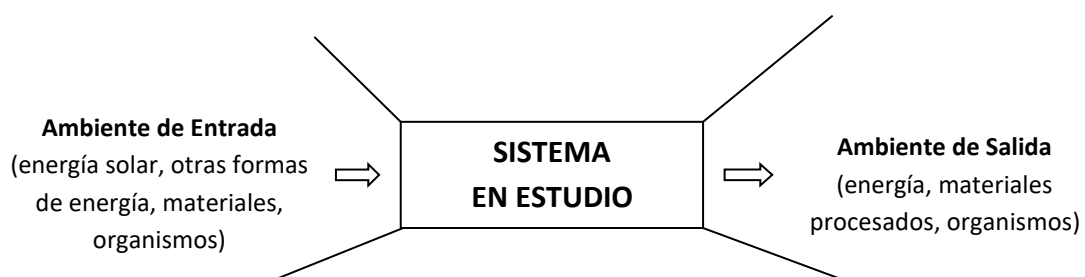


Figura 3.1.3. Relación del sistema en estudio y el medio exterior (elaboración propia)

Acerca de los ambientes de entrada y salida, cabe anotar:

- Cuanto más grande sea el sistema considerado, menos dependerá del exterior.
- Cuanto mayor sea la intensidad metabólica (actividad biológica) del sistema, mayores serán los ambientes de entrada y de salida.
- Cuanto más desequilibrio exista entre organismos autótrofos y heterótrofos, mayores serán los ambientes de entrada y de salida.
- Cuanto más maduro sea el sistema (más próximo al clímax), menores serán los ambientes de entrada y de salida.

3.1.2 Hipótesis de Gaia

El mayor de los sistemas biológicos es la **biósfera**. Si se considera la biósfera en su conjunto, su evolución puede interpretarse a través de la **Hipótesis de Gaia**, formulada por James Lovelock hacia 1969 y publicada una década después por él y Lynn Margulis.

Esta teoría postula que *“la vida fomenta y mantiene unas condiciones adecuadas para sí misma, por lo que se encarga de autorregular sus condiciones esenciales”* (por ejemplo, la temperatura, la composición química de la atmósfera o la salinidad de los océanos). Dicho de otro modo, *las formas vivas modifican el medio en que se desarrollan y son modificadas por él*, de modo que se logra un complejo sistema de control que mantiene condiciones favorables para la vida en la Tierra. Por ejemplo, según este enfoque, el elevado contenido actual de oxígeno de la atmósfera terrestre, que es imprescindible para la vida de las formas complejas que hoy habitan el planeta, no sería tal sin la ocurrencia de fotosíntesis de las plantas superiores a la escala que efectivamente tiene lugar.

Para Lovelock, Gaia es *“un sistema interactivo cuyos componentes son seres vivos”*, o bien *“una entidad compleja que implica a la biósfera, atmósfera, océanos y tierra; constituyendo en su totalidad un sistema que se retroalimenta, en busca de un entorno físico y químico óptimo para la vida en el planeta”*.

Además de mostrar las interrelaciones que existen entre todos los componentes de la biósfera, la Hipótesis de Gaia deja ver que los estados de equilibrio que pueden caracterizar a los sistemas vivos en un determinado período de tiempo son, en realidad, estadios de *quasi equilibrio* que constituyen un paso en la evolución de los ecosistemas en busca de configuraciones menos perturbables, más estables y con un uso más eficiente de la energía desde el punto de vista del sistema en su conjunto.

3.1.3 Sucesiones ecológicas

Cuando los seres vivos modifican su hábitat a tal punto que una comunidad determinada debe ceder el paso a otras formas mejor adaptadas a la nueva configuración, ocurre un paso en la **sucesión ecológica** (Figura 3.1.4). Según Margalef, la *sucesión ecológica* es precisamente uno de los resultados de los intercambios dinámicos que ocurren naturalmente en los ecosistemas.

En efecto, en períodos de tiempo prolongados se puede observar que, a través de configuraciones de equilibrio similares, ocurre una evolución previsible de los ecosistemas en busca de estadios menos perturbables, más estables y con un uso más eficiente de la energía desde el punto de vista del sistema en su conjunto. La biodiversidad de los sistemas juega un rol muy importante en el éxito de las sucesiones ecológicas, ya que los procesos de colonización de nuevas áreas, vinculados, por ejemplo, al transporte pasivo por el viento o al desplazamiento de los animales, no se dan en forma idéntica para todas las especies.

Existen sistemas “preferidos” por la Naturaleza, a los que diversos estadios o sistemas iniciales tienden a evolucionar a lo largo del tiempo. Los estados finales (estados de **clímax**) de las **sucesiones ecológicas** no son en sí mismos estáticos, aunque su crecimiento neto sea muy bajo o nulo; son sistemas vivos de gran complejidad que están preparados para *perdurar en el tiempo en ausencia de perturbaciones*, lo que no implica tampoco que se trate de “superorganismos”, ya que esto se logra a través de la mayor biodiversidad, la complejidad de las tramas tróficas y el uso eficiente de la energía. Cuando una comunidad ha alcanzado el clímax, permanece en el área que ocupa porque no motiva cambios en el

ambiente que puedan resultar desfavorables para ella misma ni favorecer el desarrollo de otras especies dominantes, y porque sus integrantes pueden resistir la competencia de otras especies provenientes del exterior.

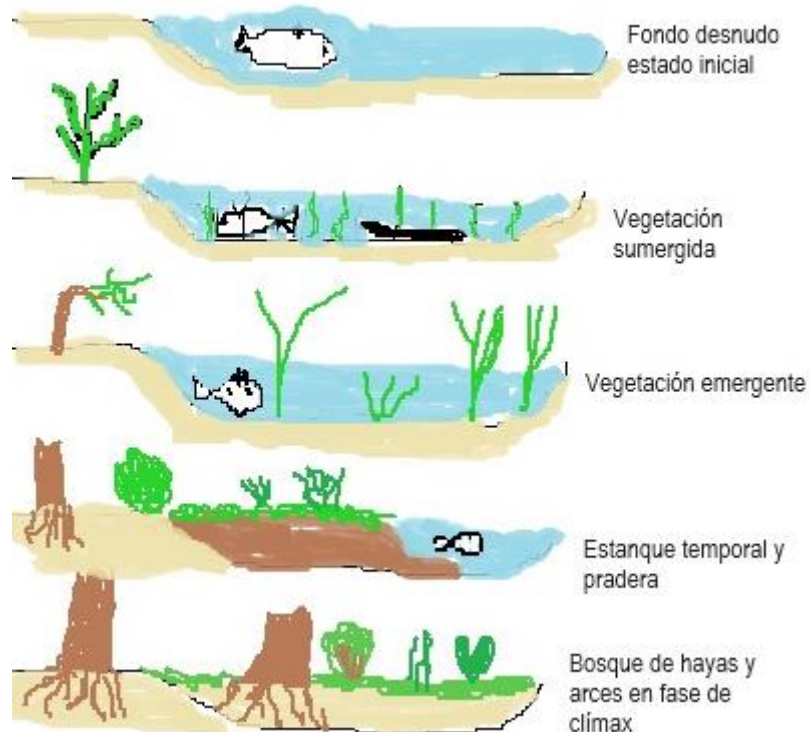


Figura 3.1.4. Representación esquemática de cambios en la biota durante los sucesivos estadios en la sucesión de un estanque a un bosque (elaboración propia)

Los ecosistemas tienen dos mecanismos para enfrentar los cambios a los que se ven expuestos, para asegurar un cierto control de la **estabilidad del sistema**. Vale la pena aclarar que, al hablar de ecosistemas, éstos incluyen seres vivos y en consecuencia la idea de **estabilidad** o **equilibrio** no hace alusión a una situación estática; se habla de un ecosistema estable cuando en el corto y mediano plazo ocurre la repetición cíclica de comunidades muy similares.

Los mecanismos de control para enfrentar los cambios se denominan **mecanismos homeostáticos**. Algunos sistemas ejercen control **por resistencia**, y otros **por resiliencia**. Los primeros se resisten al cambio lo más posible, pero si son doblegados, su recuperación es lenta y dificultosa. En cambio, los sistemas cuyos principales mecanismos de control son por resiliencia, resultan fácilmente perturbados pero también se recuperan ágil y fácilmente. La **resistencia** de un sistema biológico se refiere entonces a la capacidad de apartarse de su condición de régimen sin perder la estabilidad; la **elasticidad** o **resiliencia** se refiere a cuánto tarda en volver a un nuevo estado de régimen.

Dicho esto, los sistemas en estado de clímax tienen elevada resistencia a cambios impuestos desde el exterior; sin embargo, cuando son perturbados son muy difíciles de reconstituir. De ahí que se dice que los sistemas en **clímax** tienen **alta resistencia**. Si bien el tipo de comunidad clímax está fuertemente determinada por el clima, no existe una única comunidad clímax para cada tipo de clima.

Tampoco son tantas las comunidades clímax que existen, por lo que, cuando distintas sucesiones tienden a una misma comunidad clímax, se habla de procesos de **convergencia ecológica**.

3.2 Biocenosis

La **biocenosis** o **comunidad biótica** es el conjunto de comunidades presentes en un ecosistema. Una **comunidad** es un grupo de *individuos de diferentes especies* que habitan en una misma zona. El conjunto de *individuos de una misma especie*⁵ constituye la **población** de esa especie allí presente.

3.2.1 Clasificación de seres vivos

Los seres vivos pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios. Linneo y Whittaker proponen clasificaciones desde lo anatómico-funcional. Desde el punto de vista de la supervivencia de los seres vivos, los tres criterios principales consideran:

- cuál es la fuente de carbono que emplean (lo que permite diferenciar organismos *autótrofos* y *heterótrofos*);
- cuál es la fuente de energía (organismos *fotosintéticos* y *quimiosintéticos*);
- qué forma de respiración tienen (organismos *aerobios* y *anaerobios*) y qué especies químicas emplean como aceptores de electrones en esa reacción (organismos *litótrofos* y *organótrofos*), dado que la respiración es, en definitiva, una reacción red-ox donde una especie dona electrones y otra los acepta.

Relación taxonómica (Linneo)

En 1735 Carlos Linneo publica por primera vez su propuesta de clasificación de los seres vivos, que consolida en 1758 como el hoy llamado *sistema de clasificación binomial* (especie = género + nombre específico). Parte de los reinos y, a través de subdivisiones sucesivas en función de rasgos distintivos, llega hasta las especies y subespecies. Esta clasificación genérica ha sido mejorada, enriquecida y normalizada a través del tiempo. Por ejemplo, para la especie humana actual corresponde:

| | |
|--------------|----------------|
| Reino: | Animal |
| Tipo (Filo): | Cordados |
| Subtipo: | Vertebrados |
| Clase: | Mamíferos |
| Orden: | Primates |
| Familia: | Homínidos |
| Género: | <i>Homo</i> |
| Especie: | <i>Sapiens</i> |

En resumen: ***Homo Sapiens***

⁵ Los individuos de una misma especie son aquellos que, al reproducirse, tienen descendencia fértil.

Roles funcionales (Whittaker)

Esta clasificación establece una especie de “árbol genealógico” (Figura 3.2.1) con cinco reinos en el que parte de los organismos más simples y acaba definiendo tres grandes “ramas” de seres vivos según su *nicho ecológico*, es decir, la *función que cumplen en el ecosistema*: productores, fagótrofos y saprótrofos.

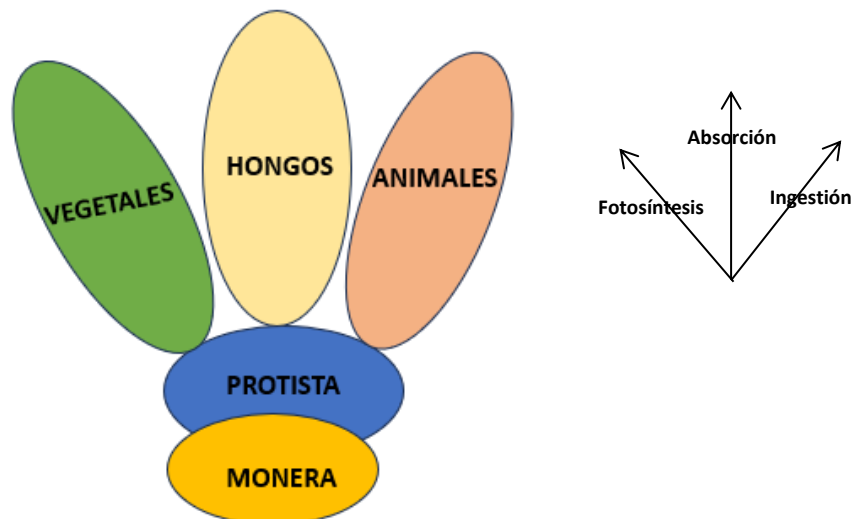


Figura 3.2.1. Sistema de cinco reinos basado en tres niveles de organización (redibujado de Odum)

En la base, Whittaker sitúa las *Moneras*, que son protistas inferiores: *bacterias* y *cianofitas*. Son organismos constituidos por células procariotas, las formas celulares más elementales; carecen de núcleo definido con membrana nuclear, sólo se reconoce una zona nuclear. Desde el punto de vista de la ingeniería ambiental, las cianofitas, cianofíceas o cianobacterias, inicialmente designadas como algas azules, revisten un interés especial: se trata de microorganismos capaces de *fixar el nitrógeno atmosférico*, cosa que muy pocos organismos en la Naturaleza pueden realizar. Las cianofitas se asocian con episodios de contaminación de tipo *eutrófico* en cuerpos de agua con poco recambio (cuerpos lénticos), como lagos, lagunas o embalses. La contaminación eutrófica, que se asocia con presencia excesiva de nutrientes, tiene efectos especialmente indeseables cuando el cuerpo de agua se emplea como fuente de agua bruta para potabilización de aguas destinadas al consumo humano.

En el nivel siguiente se ubican las *protistas* o *protistas superiores*, que corresponden en general a organismos unicelulares constituidos por células eucariotas (células con núcleo definido y membrana nuclear). Se pueden encontrar en esta categoría una gran variedad de seres vivos, como por ejemplo bacterias, protozoarios, euglenas, etc. Finalmente, el árbol se separa en tres grandes ramas, que dan respectivamente origen a productores (*Plantae*), fagótrofos (*Animalia*) y saprótrofos (*Fungi*).

La clasificación de Whittaker fue cuestionada por no contemplar todos los factores evolutivos. Esto condujo a la representación conocida como *árbol filogenético universal*, en que se consideran caracteres *fenotípicos* (morfología, movilidad, nutrición y fisiología, etc.), *genotípicos* y *filogenéticos*, como la identificación de genes utilizados como “cronómetros” evolutivos. Un *árbol filogenético* es un diagrama que representa las relaciones evolutivas entre organismos; sin embargo, no se trata de hechos comprobados, sino de hipótesis (Figura 3.2.2). El patrón de ramificación en un árbol

filogenético refleja cómo las especies u otros grupos evolucionaron a partir de una serie de ancestros comunes. Dos especies serán más cercanas cuanto más reciente sea su ancestro común.

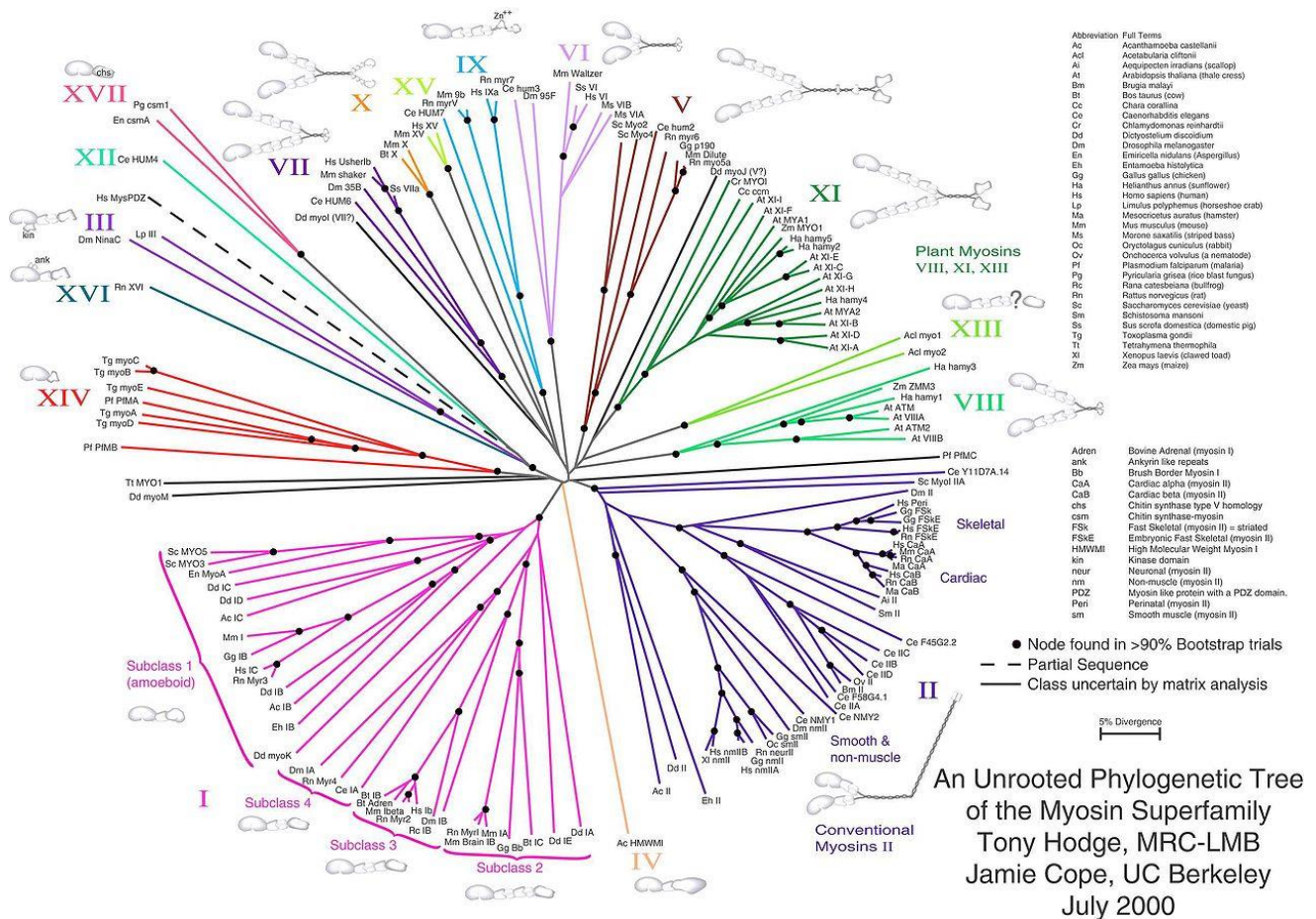


Figura 3.2.2. Ejemplo de árbol filogenético sin raíz. Tomado de

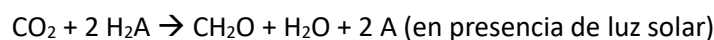
https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rbol_filogen%C3%A9tico#/media/Archivo:MyosinUnrootedTree.jpg

Las actuales posibilidades de la genética y el hecho de poder mapear el genoma de las diferentes especies le restan interés a esa representación. Es inminente que los árboles filogenéticos sean remplazados por una clasificación genómica.

Clasificación por la fuente de energía

Cuando se clasifican los seres vivos según la fuente de energía que emplean, existen dos posibilidades: organismos **fotosintéticos**, cuya fuente de energía es la luz solar, y **quimiosintéticos**, que toman energía de los enlaces químicos de los alimentos que ingieren.

La **fotosíntesis** es un proceso que comprende el almacenamiento de una parte de la energía solar como energía potencial en forma de biomasa. A partir de compuestos inorgánicos simples, y en presencia de luz solar, los organismos fotosintéticos son capaces de sintetizar moléculas orgánicas (carbohidratos). La reacción general de la fotosíntesis corresponde a la siguiente forma:



Donde CH₂O representa una molécula elemental de azúcar.

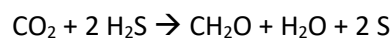
Lo más correcto sería igualar la ecuación para producir un azúcar genérico $(\text{CH}_2\text{O})_n$, aunque también se suele escribir considerando que el producto es glucosa ($n=6$: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$).

Para las plantas verdes (plantas superiores y algas), "A" es oxígeno:



La fotosíntesis de las plantas verdes tiene crucial importancia para mantener las condiciones de habitabilidad del planeta, colaborando en la regulación de los contenidos de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera.

Cuando "A" no es oxígeno (fotosíntesis anoxigénica), puede ser azufre o un compuesto orgánico. Esta forma de fotosíntesis es realizada solamente por bacterias. La mayor parte de las bacterias fotosintéticas son de vida acuática. La fotosíntesis bacteriana tiene poca importancia a escala global, aunque es de gran interés para mantener equilibrado el ciclo biogeoquímico del azufre. En este caso, la ecuación resulta:



El H_2S es un gas de olor muy desagradable, descrito como "olor a huevos podridos". Es el gas que presenta más bajo umbral de detección para las personas (0,008 ppm - 0,2 ppm). En general, los procesos biológicos que se desarrollan en fase anaerobia son susceptibles de liberar H_2S .

Los organismos que emplean una fuente de energía no solar se designan como **quimiosintéticos**. Toman la energía de los enlaces químicos que rompen al oxidar compuestos químicos de los que se han alimentado. Los organismos quimiosintéticos dependen de los fotosintéticos ya que, en última instancia, su fuente de energía está en la materia orgánica producida en la fotosíntesis.

Clasificación por la fuente de carbono

Según la fuente de carbono que emplean, los organismos pueden ser clasificados como **autótrofos** o **heterótrofos**.

Los organismos **autótrofos** toman el carbono de compuestos inorgánicos (como el CO_2) y lo emplean para sintetizar materia orgánica. Hay organismos **autótrofos fotosintéticos** y **quimiosintéticos**.

Por el contrario, los **heterótrofos** emplean el carbono que forma parte de moléculas orgánicas que han producido los autótrofos. Pueden alimentarse de organismos enteros o partes de ellos (**fagótrofos**) o bien de residuos, cadáveres o excretas de otros organismos (**saprótrofos**).

Existen unos pocos seres vivos, como las euglenas o las plantas insectívoras, que pueden funcionar tanto como autótrofos o heterótrofos según las condiciones ambientales en que se encuentren. Suelen designarse como organismos **mixótrofos**.

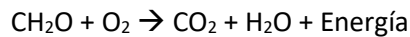
Clasificación por el tipo de catabolismo

Se entiende por catabolismo cualquier oxidación biótica que libera energía (por ejemplo, la síntesis de adenosín trifosfato ATP, que es un compuesto fundamental para la obtención de energía a nivel celular). Las dos reacciones catabólicas principales que cumplen los seres vivos son la **respiración**

aerobia y la **respiración anaerobia**, sin desconocer que existen microorganismos que realizan una reacción de **fermentación** para obtener energía.

Las reacciones catabólicas son reacciones redox, y se clasifican de acuerdo al tipo de aceptor de electrones que actúa en dicha reacción.

La **respiración aerobia** es la reacción inversa a la fotosíntesis de las plantas verdes: la materia orgánica se descompone en dióxido de carbono y agua en una reacción exotérmica. En esta reacción se libera energía para ser empleada en el mantenimiento celular, el crecimiento y la reproducción. En la respiración aerobia el aceptor de electrones es el oxígeno molecular O₂.



Es la forma de respiración de las plantas y animales superiores, y de muchos microorganismos. Los organismos **aerobios estrictos** necesitan que exista **oxígeno molecular** en el medio. Esto puede ser una condición bastante restrictiva para los organismos aerobios acuáticos, porque están supeditados al tenor de oxígeno disuelto que exista en el agua.

En la **respiración anaerobia** no interviene el oxígeno molecular. Las especies químicas que actúan como aceptores de electrones son, por ejemplo, nitratos o sulfatos. Los organismos que realizan este tipo de respiración se designan como **anaerobios**; son por lo general saprófagos (bacterias y hongos). Como ejemplo, puede citarse a las bacterias metanogénicas que habitan en el rumen de los grandes herbívoros y participan en la degradación de la celulosa. Es importante destacar que la respiración anaeróbica libera mucho menos energía que la aeróbica (Figura 3.2.3).

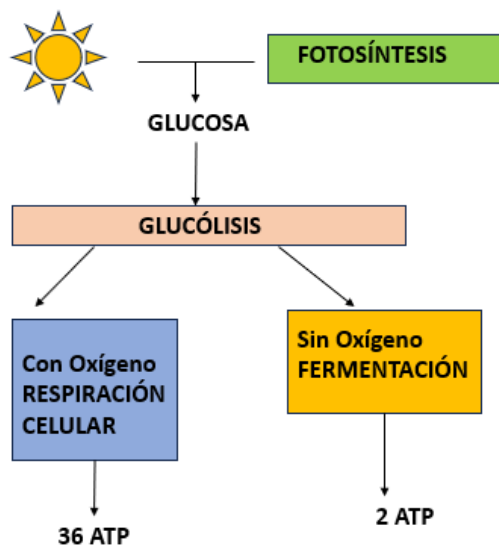


Figura 3.2.3. Obtención de energía en términos de ATP por respiración aerobia y por fermentación (elaboración propia).

La **fermentación** es una reacción catabólica más simple y de menor liberación de energía que la respiración anaerobia. Si bien se liberan compuestos orgánicos de menor peso molecular que el original, no se llega a una estabilización completa de la materia orgánica.

Existen microorganismos que pueden respirar en forma aerobia o anaerobia dependiendo de las características del medio. Se designan como microorganismos **facultativos**. En presencia de oxígeno molecular, optan por la respiración aerobia, ya que les permite obtener mayor cantidad de energía, pero no mueren si se agota el oxígeno molecular, sino que entonces respiran en forma anaerobia. Un ejemplo de microorganismos facultativos son algunos de los que integran el grupo de los *coliformes fecales*, de los que se hablará luego como indicadores de contaminación bacteriológica en aguas.

Desde el punto de vista de la ingeniería sanitaria, tiene especial interés conocer la forma en que está presente el oxígeno en un medio. Cuando está como *oxígeno molecular* se habla de *medio aerobio*; cuando se ha agotado el oxígeno molecular pero aún existe oxígeno combinado, el medio se designa como **anóxico**. En esas condiciones se desarrollan ciertos microorganismos que emplean el oxígeno combinado para respirar. Por ejemplo, las bacterias denitrificantes, que toman el oxígeno de los radicales nitrato NO_3^- , pueden emplearse en forma controlada para reducir el contenido de nitrógeno en un efluente y prevenir problemas de eutroficación en el cuerpo receptor.

A medida que los organismos tienen mayor biomasa, tienden a tener una mayor tasa respiratoria (un mayor consumo energético para el mantenimiento de sus funciones vitales), pero el consumo respiratorio es menor en relación a su peso corporal (por ejemplo, un adulto come más que un niño, pero el niño come más por unidad de peso corporal que el adulto). A su vez, los organismos que necesitan mantener una temperatura corporal constante para cumplir sus funciones vitales (organismos homeotermos) tienen un mayor consumo energético que los que carecen de ese tipo de mecanismos de regulación (organismos poiquilotermos).

3.2.2 Biodiversidad

La **biodiversidad** es el saldo entre *especiación* y *extinción* de especies. Los procesos de especiación (aparición de nuevas especies) en la naturaleza son mucho más lentos que los procesos de extinción de especies, que son fuertemente catalizados por las intervenciones humanas.

La biodiversidad o diversidad biológica se manifiesta a tres niveles:

- *Diversidad genética*, que se refiere a la diferencia en el material genético de individuos de una misma especie.
- *Diversidad de especies*, que se refiere a la variedad de especies distintas que pueden desarrollarse en los diferentes hábitats.
- *Diversidad ecológica*, que se refiere a la existencia de distintos ecosistemas.

Valor de las especies

Cada especie puede tener algún valor de tipo *utilitario*. El **valor utilitario** de las especies suele responder a uno o más de los siguientes criterios:

- Una especie es valiosa en tanto es un **recurso para la agricultura, ganadería, silvicultura o acuicultura**.
- Una especie es valiosa en función de que pueda ser un **recurso medicinal o farmacéutico**. La mayor parte de los principios activos de los medicamentos en uso provienen de sustancias naturales, y

entre ellos una proporción importante tiene que ver con las especies propias del bosque tropical. Pese a ello, la amplia mayoría de las especies no ha sido estudiada aún desde su potencial medicinal.

- Una especie puede tener un **valor comercial directo** (por ejemplo, las *mascotas exóticas* que se importan en algunos países).
- Una especie puede ser valiosa desde un punto de vista **recreativo** (por ejemplo, para el *ecoturismo*); **estético** (por ejemplo, para *fotografía*); o **científico**.

La riqueza y diversidad biológicas tienen un **valor intrínseco**, más allá del valor utilitario que pueda asignarse en forma más inmediata o directa. La diversidad fomenta -y en consecuencia permite conservar- la integridad biológica. Permite que los sistemas biológicos puedan adaptarse con éxito ante los cambios ambientales o evolucionar para sobreponerse a ellos. El valor intrínseco de las especies no siempre es tan simple de visualizar, por lo que suele caer en un tema de debate con argumentos que pueden contraponerse hasta desde puntos de vista filosóficos o religiosos. Pero el problema no radica sólo en un planteo de ética ambiental -¿por qué el hombre puede optar por arruinar el hábitat o condicionar la supervivencia de una especie hasta extremos que la lleven a su desaparición?-, sino en que el equilibrio de los sistemas y la preservación de la vida en el planeta dependen de la diversidad biológica. Por ejemplo, los insectos polinizadores o simplemente visitantes de flores silvestres tienen un rol importante para reducir la presencia de plagas y mejorar las defensas de los vegetales; de ahí que parece resultar interesante promover la presencia de flores silvestres en la cercanía de áreas cultivadas (Comisión Europea, 2017).

En efecto, los seres vivos han sobrevivido durante períodos de tiempo muy prolongados adaptándose al medio y adaptándolo a sus necesidades. La pérdida progresiva de información tendería a reducir paulatinamente las bases genéticas en las que se apoyan las posibilidades de adaptación y evolución de las diferentes formas de vida sobre la Tierra, además de vulnerar progresivamente sus defensas y posibilidades de acción frente a diversos agentes y a otros seres vivos. Entre tales agentes, las modificaciones antropogénicas en las condiciones de equilibrio global de la biósfera, que ocurren con creciente velocidad en los últimos años, resultan progresivamente más significativas. A esto se suman otras acciones humanas cuyos efectos en el largo plazo son muy difíciles de prever (la modificación de la información genética a través de la biomanipulación, la ingeniería genética, etc.).

Causas de pérdida de biodiversidad

Las principales causas de pérdida de biodiversidad se presentan sintéticamente a continuación.

- **Conversión:** se refiere a la alteración física del hábitat, en general vinculada con cambios en el uso del suelo.
- **Fraccionamiento:** es el resultado de la reducción del espacio efectivamente colonizable por una población o comunidad; en general se relaciona también con cambios en el uso del suelo, que llevan a que no todos los individuos que originalmente ocupaban un área puedan sobrevivir si el tamaño de ésta se reduce. Las barreras físicas que muchas veces imponen las obras de ingeniería pueden ser consideradas como elementos de conversión o de fraccionamiento del hábitat. Entre otras consecuencias, pueden subdividir poblaciones e incluso dejar alguna de las fracciones por debajo de un tamaño de supervivencia sostenible.

- **Simplificación:** el retiro selectivo de algunos elementos, factores o especies de un ecosistema condiciona su equilibrio y puede incluso condicionar su supervivencia como tal. Nunca es del todo claro cuándo el retiro de un elemento o de una especie en un ecosistema va a generar un desequilibrio irreparable que impida definitivamente el funcionamiento del sistema como tal.
- **Contaminación:** la introducción de sustancias, organismos o formas de energía en un ámbito al que no pertenecen o en cantidades diferentes a las propias de ese ámbito pueden generar, entre otras consecuencias, la alteración del equilibrio ecológico de una zona. Procesos de contaminación con consecuencias sobre la biodiversidad son, por ejemplo, los derrames de hidrocarburos u otras sustancias tóxicas, el uso indiscriminado de plaguicidas de difícil degradación, el debilitamiento de la capa de ozono, el calentamiento global, etc.
- **Introducción de especies exóticas:** entre otros mecanismos, las especies introducidas pueden competir por un nicho trófico o carecer de enemigos naturales que controlen su reproducción o avance. Entre los casos más significativos en nuestro país cabe citar el ligustro (*Ligustrum lucidum*), la carpa (*Cyprinus carpio*), la almeja asiática (*Corbicula fluminea*) y el mejillón dorado (*Limnoperna fortunei*).
- **Abuso de especies para proveer elementos prescindibles:** pieles, cuernos, plumas, maderas exóticas, mascotas sofisticadas.

Aunque menos inmediatas que las causas anteriores, no se puede dejar de mencionar las siguientes:

- **Crecimiento demográfico:** incrementa la presión sobre los recursos para obtención de alimentos, combustible y abrigo.
- **Pobreza:** la pobreza extrema, entendida como imposibilidad de elección, es sin duda la causa que debe atacarse si se busca una solución sostenible a los problemas ambientales en sus diversas manifestaciones. Estudios actuales muestran que la capacidad de producción del planeta permitiría en este momento alimentar a toda la población mundial, a condición de que el reparto fuera equitativo. Por otra parte, buena parte de los sistemas económicos vigentes asignan un valor muy bajo para los recursos naturales y servicios ecológicos, por lo que suele ser “más barato” –en sentido estrictamente monetario- y por cierto más fácil, degradar o contaminar el ambiente que trabajarlo en forma sostenible.

El Convenio sobre Diversidad Biológica fue promovido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA); se aprobó en la Conferencia de Nairobi en mayo de 1992 y entró en vigor el 29 de diciembre de 1993. Los objetivos de ese Convenio son: la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.

Dentro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), además de proteger los suelos de los procesos de degradación y desertificación, se propone preservar los ecosistemas terrestres, prevenir la introducción de especies exóticas invasoras en los mismos, reducir la degradación de los hábitats naturales, proteger a las especies amenazadas para prevenir su extinción.

Siguiendo el método de categorización de las especies según su estado de conservación que aplica la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), Uruguay elabora periódicamente listas de especies amenazadas o en peligro de extinción, como forma de contribuir a su preservación.

Aunque se pueden encontrar antecedentes que datan de la época artiguista, el proceso de elaboración de listas de especies prioritarias para su conservación se inició en Uruguay en el ámbito oficial en 2006. Estas listas pretenden contribuir a orientar acerca de las especies que deberían ser priorizadas a la hora de diseñar medidas de gestión ambiental. Los criterios que se aplican para definir si una especie debe o no ser incluida en las listas de especies prioritarias son tres (Tabla 3.1): relevancia, urgencia y utilidad.

En Uruguay se han descrito más de 3.400 especies nativas, de las que un 70 % corresponden a plantas y 13 % a aves. Sin embargo, se estima que el número total de especies nativas podría ser considerablemente mayor (Soutullo et al., 2013).

Las especies identificadas al aplicar los criterios de la Tabla 3.2 se clasifican en cuatro listas (Soutullo et al., 2013): especies **prioritarias para la conservación en Uruguay**, especies **amenazadas en Uruguay**, especies **prioritarias para el SNAP** y especies **con potencial para su explotación sustentable** (por ejemplo, las que cumplen con el último criterio de la Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Criterios para incluir especies en la lista de especies prioritarias en Uruguay (basado en Soutullo et al., 2013)

| Categoría de criterios | Criterios |
|--|--|
| Relevancia de la contribución de Uruguay a la conservación de esas especies en el mundo | Especies con distribución geográfica restringida a Uruguay o a un sector del continente americano que incluye parte del territorio nacional, pero cuyo tamaño no supera la superficie de Uruguay (< 200.000 km ²). |
| | Especies listadas como vulnerables, amenazadas o críticamente amenazadas en la <i>Lista roja 2011</i> de UICN. |
| | Especies migratorias que utilizan parte del territorio nacional en alguna etapa de su ciclo anual. |
| Urgencia: necesidad de implementar estrategias para evitar el deterioro de esas especies en el país | Especies con un área de distribución en Uruguay inferior al 10 % del territorio nacional (< 20.000 km ² u ocurrencia en menos de 30 celdas de la grilla 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar). |
| | Especies que en los últimos 20 años han sufrido una disminución >20 % en su tamaño poblacional en Uruguay, inferida a partir de: la disminución en la extensión de su hábitat; la existencia de una remoción sistemática de individuos, asociada a disminuciones en la abundancia observada en sitios específicos; la ausencia de registros en los últimos 10 años en sitios donde la especie había sido previamente registrada. |
| | Especies identificadas como amenazadas en el país por algún estudio previo. |
| Utilidad: contribución potencial o real de esas especies al bienestar humano | Especies singulares desde el punto de vista taxonómico o ecológico; incluye especies bioingenieras y especies clave. |
| | Especies de valor medicinal, cultural o económico; incluye especies con centro de diversidad en el país, o variedades silvestres de especies domesticadas o cultivadas. |

Principales ecosistemas del Uruguay

En el IV Informe Nacional al Convenio sobre la Diversidad Biológica elaborado por MVOTMA-DINAMA⁶ en 2010, los principales ecosistemas presentes en nuestro territorio se introducen como sigue:

⁶ Hasta la creación del actual Ministerio de Ambiente, el MVOTMA era el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente y la DINAMA era una de sus cuatro Direcciones Nacionales: la Dirección Nacional de Medio Ambiente.

“Los ecosistemas presentes en el territorio de nuestro país son el resultado de un largo devenir de interacciones recíprocas entre múltiples factores geoambientales, donde las fuerzas de génesis y evolución (factores y procesos) están en permanente cambio, más allá de su estabilidad o regularidad en su comportamiento temporal, todo lo cual induce y provoca síntesis, alteraciones, recombinaciones, destrucciones y nuevas génesis a nivel de las estructuras y funcionalidades de dichos ecosistemas (MVOTMA- PNUD/GEF, 1999).

Los criterios geomorfológicos dividen nuestro territorio en grandes unidades que presentan diferentes microclimas, lo que determina que la correspondencia entre unidades geomorfológicas y de vegetación no sea simple, donde a cada unidad geomorfológica no siempre le corresponde una única formación vegetal, sino un complejo mosaico de formaciones vegetales. La vegetación, por su desarrollo y estabilidad, constituye, por lo general, el integrante más conspicuo de una biocenosis, estructurando los ecosistemas terrestres. Las distintas especies vegetales requieren condiciones especiales de temperatura, humedad y luz, por lo que su distribución está determinada por factores geográficos, climáticos, edáficos y bióticos (Molina, 1997).

Estas formaciones vegetales no presentan límites definidos, sino que están representados por un ecotono, donde las especies vegetales se van sustituyendo unas a otras en función de algún gradiente. Asimismo, la incorporación de nuevas áreas de cultivo (agrícola, forestal), van determinando cambios en la composición florística de los ecosistemas, al mismo tiempo que modifican el paisaje natural” (ver Figura 3.2.4).

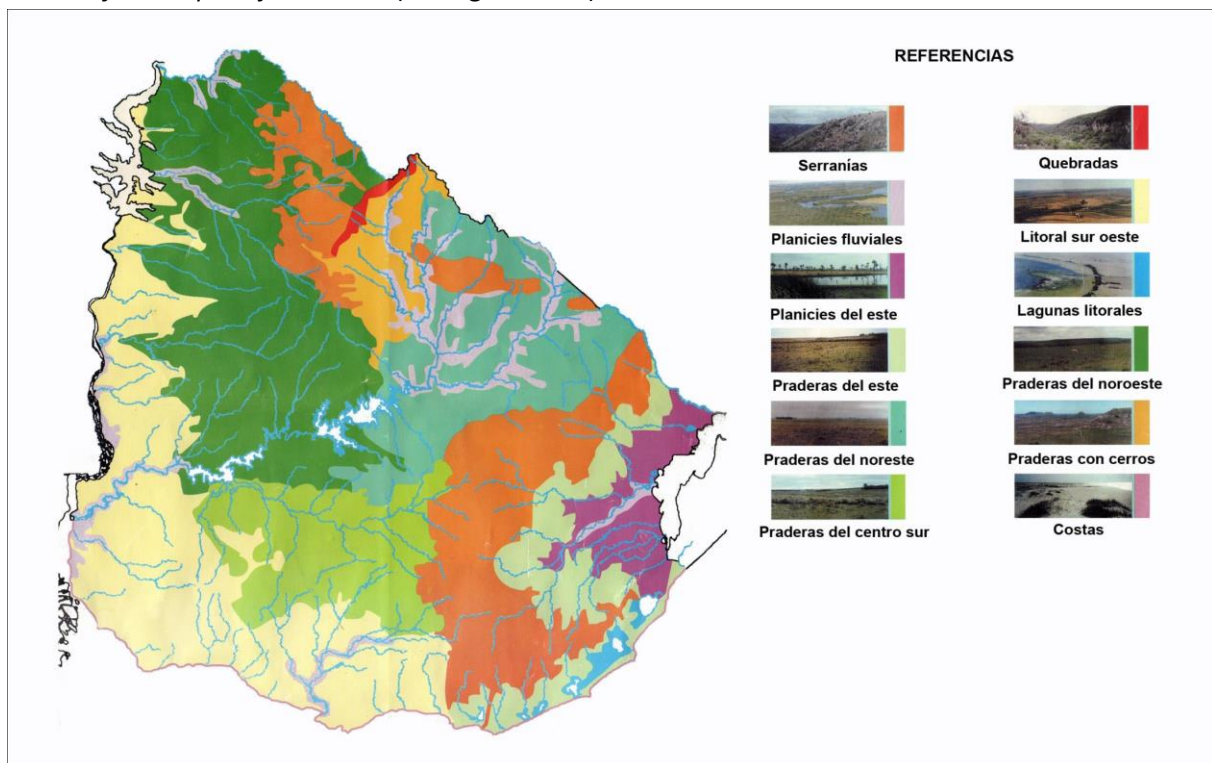


Figura 3.2.4. Principales ecosistemas del Uruguay según Evia y Gudynas, en: Rivas (S/A)

Praderas: son formaciones constituidas principalmente por formas herbáceas (gramíneas perennes) y/o subarborescentes donde los árboles y arbustos son raros. Sobre ellas se desarrollan diversas comunidades de bosques y humedales. En Uruguay hay unos 117.000 km² de praderas, en las que hay más de 350 especies y variedades botánicas de gramíneas nativas constituyendo una de las áreas de mayor riqueza de gramíneas del mundo. Las praderas son ecosistemas complejos y dinámicos, donde

predominan gramíneas perennes de ciclo estival (ciclo fotosintético C4⁽⁷⁾). El pastoreo continuo ha contribuido a disminuir la frecuencia de especies invernales (ciclo fotosintético C3⁽⁷⁾). Entre las principales funciones ecológicas de las praderas cabe mencionar: proveer de protección física al horizonte superficial (y más activo del suelo) frente al pisoteo de los animales y la erosión hídrica y eólica; reducir el escurrimiento, evitar la contaminación de cursos de agua por sedimentos del suelo y favorecer el drenaje interno del agua que alimenta los acuíferos; amortiguar las variaciones de temperatura, manteniendo así mejores condiciones para la vida vegetal y animal, en relación al suelo desnudo; ofrecer sustento nutritivo casi exclusivo de una población diversa de herbívoros. El estado general de conservación de la región biogeográfica uruguaya es vulnerable, con síntomas de degradación genética por pérdida de especies y/o ecotipos e invasión de especies foráneas (cardos, gramilla).

Ecosistemas de bosques: Los bosques nativos cubren alrededor del 4,2 % del territorio nacional y varían según las asociaciones vegetales que lo integran. Se pueden clasificar en:

- **Bosque fluvial, ribereño o de galería** es el que se presenta en las márgenes de ríos y arroyos. Hacia el sur va variando su composición y disminuyendo en tamaño y altura.
- **Bosque de parque** es el localizado en zonas próximas al litoral del Río Uruguay, como nexo entre el bosque fluvial y las comunidades herbáceas. Se trata de asociaciones xerófitas (es decir, adaptadas a ambientes secos) con una baja densidad de individuos, que comparten características con la provincia del Espinal.
- **Bosque de quebrada** ocurre en las quebradas húmedas del Norte y Noreste del país. Las condiciones de humedad y temperatura permiten el desarrollo de una vegetación característica de tipo subtropical con alta densidad de especies de gran porte. Se ubican en quebradas, asociados a cursos de aguas (algunos no permanentes) en profundas gargantas, con paredones casi verticales.
- **Bosque serrano** se da en las partes más altas de las sierras, muchas veces conformando comunidades arbustivas. La frecuencia de especies xerófitas es alta.
- **Bosque costero**, a orillas del Río de la Plata y costa del Océano Atlántico, es un bosque psamófilo, es decir, se desarrolla asociado a suelos arenosos sobre dunas fijas. Tiene un solo estrato arbóreo (4 m a 8 m de altura), arbustos, hierbas trepadoras y epífitas.
- **Palmares** son comunidades vegetales constituidas por un estrato arbóreo monoespecífico de palmas. Comprenden asociaciones de *Butia capitata* en el sureste del país que ocupan unas 70.000 há; y los de *Butia yatay* en el Noreste ocupan unas 3.000 há. Los palmares de *B. capitata* son únicos en el mundo y son de los más australes del mundo. Existe un palmar pequeño de *Butia paraguayensis* en el cerro Miriñaque en Tacuarembó. Las densidades del palmar de butiá pueden variar desde menos de 50 a más de 500 palmas por hectárea.

Humedales: son formaciones de tierras bajas inundadas en forma esporádica o permanente, que usualmente reciben aportes de flujos subterráneos, donde las aguas permanecen poco profundas, permitiendo el crecimiento de vegetación emergente de raíz arraigada. Aproximadamente 3.500 km² del territorio están ocupados por lagos y lagunas y otros 4.000 km² por humedales permanentes y

⁷ Ver 3.3 Factores ambientales potencialmente limitantes

temporarios de dimensiones diversas. Los Bañados del Este se destacan por su extensión y comprenden una sucesión de lagunas y bañados asociados, que integran la Reserva de Biósfera de la UNESCO “Bañados del Este” y también constituyen, junto con los Esteros de Farrapos, un Sitio Ramsar de importancia internacional.

Ecosistemas costeros: Son los ecosistemas de la interfase terrestre-acuática distribuidos a lo largo de los litorales del Río de la Plata y del océano Atlántico. Además de la vegetación psamófila, en algunas zonas de suelos más firmes aparecen ciertas formas de bosques achaparrados. En la costa oceánica, los ecosistemas se ven enriquecidos por la presencia de una sucesión de lagunas y bañados asociados, algunos de aguas dulces y otros con intrusión salina, que constituyen particulares hábitats de interés por su riqueza biológica. Dentro de las zonas costeras localizadas en las zonas bajas y planicies inundables de las lagunas es común encontrar un importante desarrollo de comunidades en los bañados salinos, como los cangrejales de la laguna de Rocha, arroyo Valizas y el arroyo Solís Chico. El sistema laguna costera-bañado salino es área de cría o desove de muchas especies y sirve de refugio y zona de alimentación de otras tantas vinculadas a las lagunas y arroyos costeros.

El Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP)

Uruguay ratificó el Convenio de las Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica (CDB) por Ley 16.408 de agosto de 1993, al que había adherido en oportunidad de la Cumbre de Río en 1992, comprometiéndose formalmente a llevar adelante los objetivos de dicho Convenio. A partir del compromiso asumido por el país, éste debe presentar informes de avance periódicos en relación al cumplimiento de los objetivos del Convenio.

En el año 2000 se creó el Sistema Nacional de Áreas Protegidas SNAP por Ley Nº 17.234. Sin embargo, recién en 2005 comenzó a funcionar efectivamente, al promulgarse el Decreto 52/005. El SNAP diferencia seis categorías de áreas protegidas: parque nacional; monumento natural; paisaje protegido; sitios de protección; áreas de manejo de hábitats y/o especies; área protegida con recursos manejados.

Las 18 áreas que actualmente integran el SNAP totalizan 336.203 há. Se presentan en la Figura 3.3.14 y se listan de Norte a Sur y de Oeste a Este en la

Tabla 3.2; en la segunda parte de esa tabla se presentan las áreas que están en proceso de ingresar al SNAP o cuya incorporación se está discutiendo.

Tabla 3.2. Nómina de áreas protegidas según situación en SNAP (ordenados N-S y W-E)

| Sitio | Estatus actual | Departamento |
|---|---|----------------|
| Rincón de Franquía | Área de manejo de hábitats y/o especies | Artigas |
| Valle del Lunarejo | Paisaje protegido | Rivera |
| Montes del Queguay* | Área protegida con recursos manejados | Paysandú |
| Paso Centurión y Sierra de Ríos | Área de manejo de hábitats y/o especies | Cerro Largo |
| Esteros de Farrapos e Islas del Río Uruguay | Parque Nacional | Río Negro |
| Esteros y Algarrobales del Río Uruguay* | Área de manejo de hábitats y/o especies | Río Negro |
| Quebrada de los Cuervos y Sierra del Yerbál | Paisaje protegido | Treinta y Tres |
| Grutas del Palacio | Monumento Natural | Flores |
| Localidad Rupestre de Chamangá | Paisaje Protegido | Flores |
| San Miguel | Parque Nacional | Rocha |
| Cerro Verde | Área de manejo de hábitats y/o especies | Rocha |

| Sitio | Estatus actual | Departamento |
|--|---|---------------------------------|
| Laguna de Castillos | Paisaje protegido | Rocha |
| Cabo Polonio | Parque Nacional | Rocha |
| Humedales de Santa Lucía | Área protegida con recursos manejados | Canelones, San José, Montevideo |
| Humedales e Islas del Hum | Parque Nacional | Soriano |
| Laguna de Rocha | Paisaje protegido | Rocha |
| Laguna de Garzón | Área de manejo de hábitats y/o especies | Maldonado, Rocha |
| Isla de Flores | Parque Nacional | Montevideo |
| Áreas aún no ingresadas al SNAP | | |
| Laureles - Cañas | En proceso de ingreso al SNAP | Rivera |
| Islas del Queguay | En estudio para su ingreso al SNAP | Paysandú |
| Laguna Negra | En estudio para su ingreso al SNAP | Rocha |
| Parque Nacional Arequita | En estudio para su ingreso al SNAP | Lavalleja |



Figura 3.2.5. Áreas integradas al Sistema Nacional de Áreas Protegidas SNAP
<https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/es-snap>

Entre los paisajes que actualmente son objeto de conservación por parte del SNAP, se incluyen planicies, praderas, lagunas, islas, aguas, serranías, quebradas y costas. Entre los ecosistemas que son objeto de conservación, cabe listar arbustales (pradera con abundantes especies leñosas de bajo

porte), bañados, bosques de quebrada, bosques de relieve plano, ondulado y serrano, bosque fluvial, bosque y matorral psamófilo, parque de butiá (palmar), parque (pradera arbolada) de relieve plano, ondulado y serrano, pradera de relieve plano, ondulado y serrano.

3.3 Factores ambientales potencialmente limitantes

El desarrollo de los seres vivos está condicionado por una multiplicidad de factores que, si se encuentran en determinados intervalos, permiten su supervivencia. La idea de los *límites de tolerancia* fue planteada por primera vez por Shelford hacia 1913, quien se percató de que no sólo existen mínimos sino también máximos que pueden condicionar el desarrollo de cada especie, es decir, que el exceso en un factor suele limitar con tanta frecuencia y efectividad como la escasez (por ejemplo, la alta temperatura).

Se designan como *límites de tolerancia* los extremos del rango (para cada factor ambiental) en el cual es posible la supervivencia de una especie. El factor que, en una cierta configuración y momento, está más próximo a caer fuera del rango que permite la vida de esa especie, es el que se convierte en ese caso en el *factor limitante*.

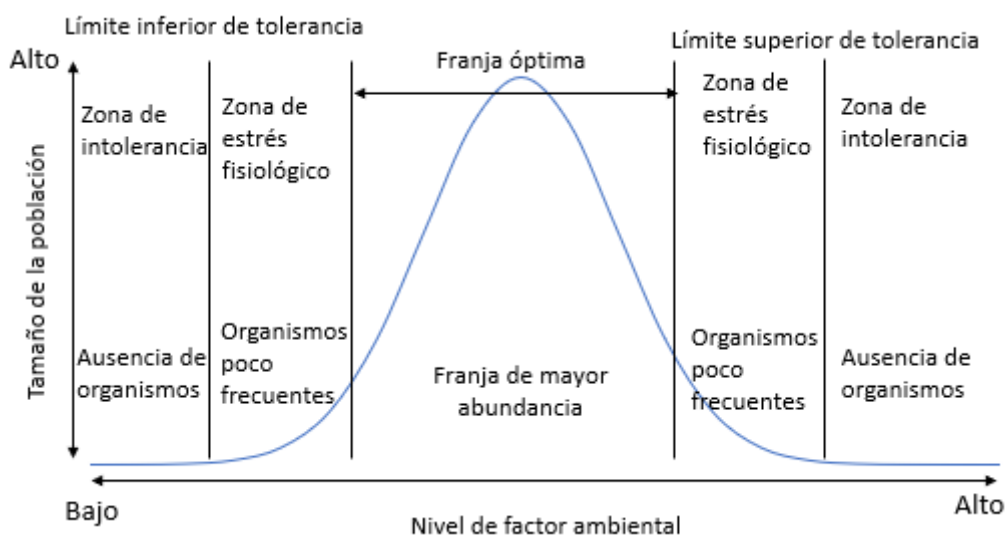


Figura 3.3.1. Representación esquemática de los límites de tolerancia (adaptado de Enkerlin et al., 1997)

A propósito de los límites de tolerancia, cabe decir:

- Los organismos pueden tener gamas de tolerancia diferentes para distintos factores (por ejemplo, un mismo organismo puede tener una gama de tolerancia muy amplia para un factor y muy estrecha para otro).
- Los organismos con gamas de tolerancia más amplia para los distintos factores, son los que tienen mayores posibilidades de distribuirse en áreas geográficas mayores.
- Durante el período de reproducción, los límites de tolerancia del individuo y de sus semillas, huevos, embriones, plántulas, larvas, etc. son más estrechos. La interacción de distintos factores puede modificar la respuesta de los organismos a cada uno de ellos por separado.

Los grados de tolerancia se designan con el prefijo **eurí-** cuando son amplios y con el prefijo **esteno-** cuando son estrechos (ejemplos: eurihalino – estenohalino; euritérmico – estenotérmico; eurifágico – estenofágico; etc.).

A continuación, se presentan algunos de los principales factores del ambiente físico que pueden llegar a convertirse en factores limitantes.

3.3.1 Temperatura

La vida como se la conoce actualmente sólo puede existir en un cierto rango acotado de temperaturas, mucho más estrecho que el rango de temperaturas que se conoce en el Universo.

Los organismos que tienen un sistema de regulación de la temperatura corporal y por lo tanto la mantienen más o menos constante, se designan como **homeotermos** (son los que usualmente se refieren como animales *de sangre caliente*); los que no lo tienen, y por lo tanto su temperatura corporal es acorde a la del entorno se designan como **poiquilotermos** (animales *de sangre fría*). Los organismos homeotermos tienen un mayor consumo energético que los que carecen de ese tipo de mecanismos de regulación, pero a su vez tienen mayores posibilidades de colonización de hábitats. Son muy pocos los poiquilotermos que pueden vivir permanentemente por encima de 45 °C, y casi ninguno lo puede hacer a menos de 0 °C. Los organismos adaptados a vivir a bajas temperaturas se llaman **oligotermos** o **criófilos**, en tanto los que viven a altas temperaturas son **politermos** o **termófilos**.

A mayor temperatura, las tasas metabólicas aumentan. También por lo general aumenta la velocidad de las reacciones bioquímicas. Esto hace que los organismos tengan rangos de temperatura ambiente con los que son compatibles, fuera de los cuales sus organismos se descompensan y no pueden sobrevivir.

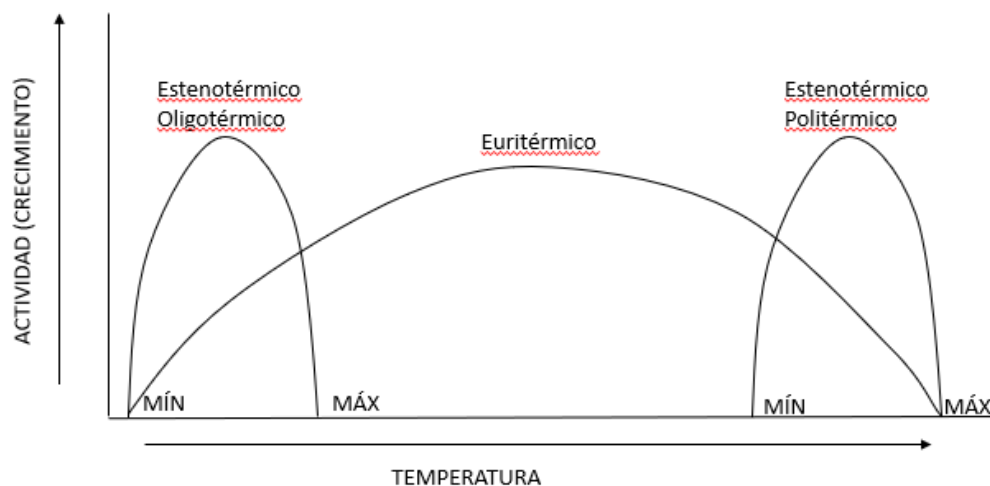


Figura 3.3.2. Actividad de organismos oligotérmicos, euritérmicos y politérmicos en función de la temperatura (redibujado de Odum, 1985)

No sólo interesa el valor –o el valor promedio- de la temperatura, sino su variación temporal. Se ha demostrado que existen organismos que se desarrollan mucho más aceleradamente en medios de temperatura fluctuante que aquellos que están a temperatura constante, aunque la temperatura media en ambos casos sea igual. Actualmente los períodos prolongados con temperaturas rigurosas - muy altas o muy bajas- asociados con los fenómenos derivados del cambio climático (olas de frío, olas de calor), se consideran causa de mortalidad en poblaciones vulnerables –como niños y ancianos-.

Como factor ambiental, la temperatura es fácil de medir y el instrumental para hacerlo es muy accesible, pero no por ello debe caerse en simplificaciones excesivas y atribuirle más importancia o incidencia de la que realmente puede tener.

3.3.2 Luz

La luz es imprescindible como fuente energética para la vida, pero sin embargo también puede ser empleada como biocida, puesto que en determinadas condiciones la exposición directa a ciertas longitudes de onda con suficiente intensidad, puede ocasionar la muerte. Distintos seres vivos tienen diferentes respuestas a este estímulo. La luz visible tiene longitudes de onda comprendidas entre 390 y 760 μm ; longitudes de onda menores corresponden a radiación ultravioleta –algunas de ellas son biocidas-; longitudes de onda mayores corresponden a radiación infrarroja, ondas de audio, etc.

En **ambientes terrestres** existen vegetales adaptados a distintas intensidades de luz y, concomitantemente, a diferentes condiciones de temperatura ambiente. Los vegetales que se designan como **C3** están adaptados a intensidades lumínicas y temperaturas ambiente medias, y se suelen inhibir ante grandes intensidades lumínicas o altas temperaturas. Su mayor productividad ocurre a intensidades de luz y temperatura moderadas. Este tipo de vegetales constituyen la base de la alimentación mundial. El inminente corrimiento de las zonas climáticas asociado con el cambio climático genera preocupación en este sentido, puesto que implica una fuerte restricción a la explotación de estos vegetales y la necesidad de adaptarlos a otros tipos de suelos, subsidiarlos de otra manera –por ejemplo, con riego-, etc. Por su parte, los vegetales **C4** tienen mejor desempeño a mayor temperatura ambiente y a mayor intensidad lumínica. Realizan un uso del agua más eficiente que los vegetales C3. Es el caso de las gramíneas, por ejemplo, pero son relativamente pocos los vegetales de los que depende la alimentación mundial que caen en esta categoría.

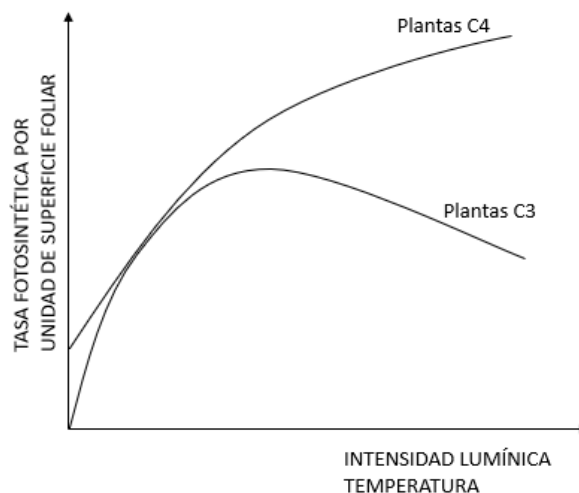


Figura 3.3.3. Respuesta de las plantas C3 y C4 al incremento de la intensidad de luz y temperatura (redibujado de Odum)

En **ambientes acuáticos** la luz se constituye fácilmente en factor limitante en cuerpos de agua, donde la profundidad de penetración de los rayos solares marca la diferencia entre las zonas habitables y no habitables por organismos fotosintéticos. La intensidad lumínica decae exponencialmente con la

profundidad. Así como hay “plantas de sombra” y “plantas de sol”, también hay organismos acuáticos fotosintéticos que viven en las zonas de mayor intensidad lumínica y otros que viven en la parte más profunda de la zona fótica o de penetración de la luz solar.

Una forma sencilla para determinar la profundidad de penetración de la luz en el agua es el empleo del Disco de Secchi. Se trata de un disco de 30 cm de diámetro que puede ser de color blanco, liso, o estar dividido en cuadrantes pintados alternadamente de blanco y de negro. El disco se cuelga de una cinta graduada y se lo hace bajar lenta y horizontalmente dentro del agua. Se registra la profundidad a la que el disco deja de verse. Luego se comienza a izar el disco lentamente, y en el momento que comienza a verse se toma un nuevo registro. El promedio de ambos valores es lo que se conoce como la “profundidad de Disco Secchi” (DS), que se asume es aproximadamente la mitad del espesor de la capa fótica (vale decir, si la profundidad de disco Secchi es 40 cm, se asume que la luz solar penetra hasta los 80 cm).

Por último, y también vinculado a la luz como factor limitante para el desarrollo de los seres vivos, la duración del día o **fotoperíodo** es de gran importancia en el cumplimiento de los ciclos biológicos. La fotoperiodicidad se asocia con un complejo mecanismo de regulación biológica que se conoce como *reloj biológico*, que interviene en funciones muy diversas como la alimentación, la reproducción, las migraciones, etc. Los seres vivos “registran” los ciclos día-noche y las variaciones en la longitud de los días y en función de ello definen el momento de aparearse o de migrar. El estudio en laboratorio del fotoperíodo no es complejo, puesto que se trata de una variable fácilmente controlable. Asimismo, su manejo con fines productivos es muy conocido, especialmente en actividades de cría.

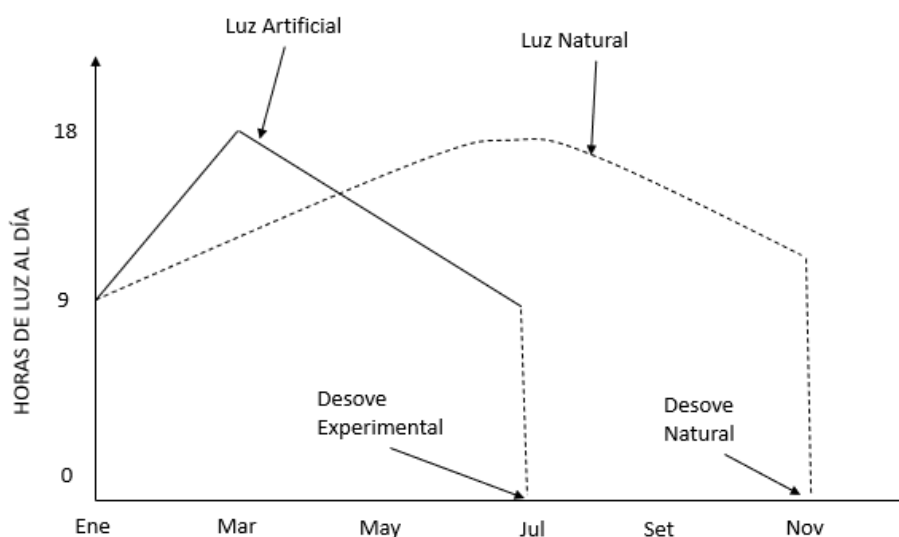


Figura 3.3.4. Control de la temporada reproductiva de la trucha a través del manejo de la luz (redibujado de Odum)

Contaminación lumínica

La contaminación lumínica se refiere al exceso de energía luminosa emitida por fuentes antropogénicas. Se manifiesta especialmente por la noche y resulta incrementada por fenómenos ópticos como la reflexión y la difusión en la atmósfera.

Además de afectar la calidad ambiental de vida de las personas en las ciudades, puede tener consecuencias sobre los sistemas naturales al modificar el comportamiento de algunos animales; por ejemplo, insectos y animales nocturnos pueden encandilarse, desorientarse e incluso alterar sus comportamientos migratorios.

Por otra parte, la alteración del fotoperíodo debido a la intensidad de la luz artificial en ciudades y proximidades de carreteras, puede modificar los ciclos vitales de plantas y animales. Una investigación recogida por Comisión Europea (2016) señala que la luz artificial en áreas urbanas implica la aparición temprana de brotes en la primavera, lo que aumenta el riesgo de exposición a heladas y patógenos. También se reduce la resistencia a los daños foliares vinculados a la contaminación del aire. Los cultivos de soja y maíz próximos a lugares con intensa iluminación artificial crecen rápidamente, pero sin florecer. Los polinizadores diurnos y nocturnos (insectos, murciélagos) pueden verse afectados por el exceso de luz artificial, lo que, en consecuencia, altera los ciclos reproductivos de los vegetales.

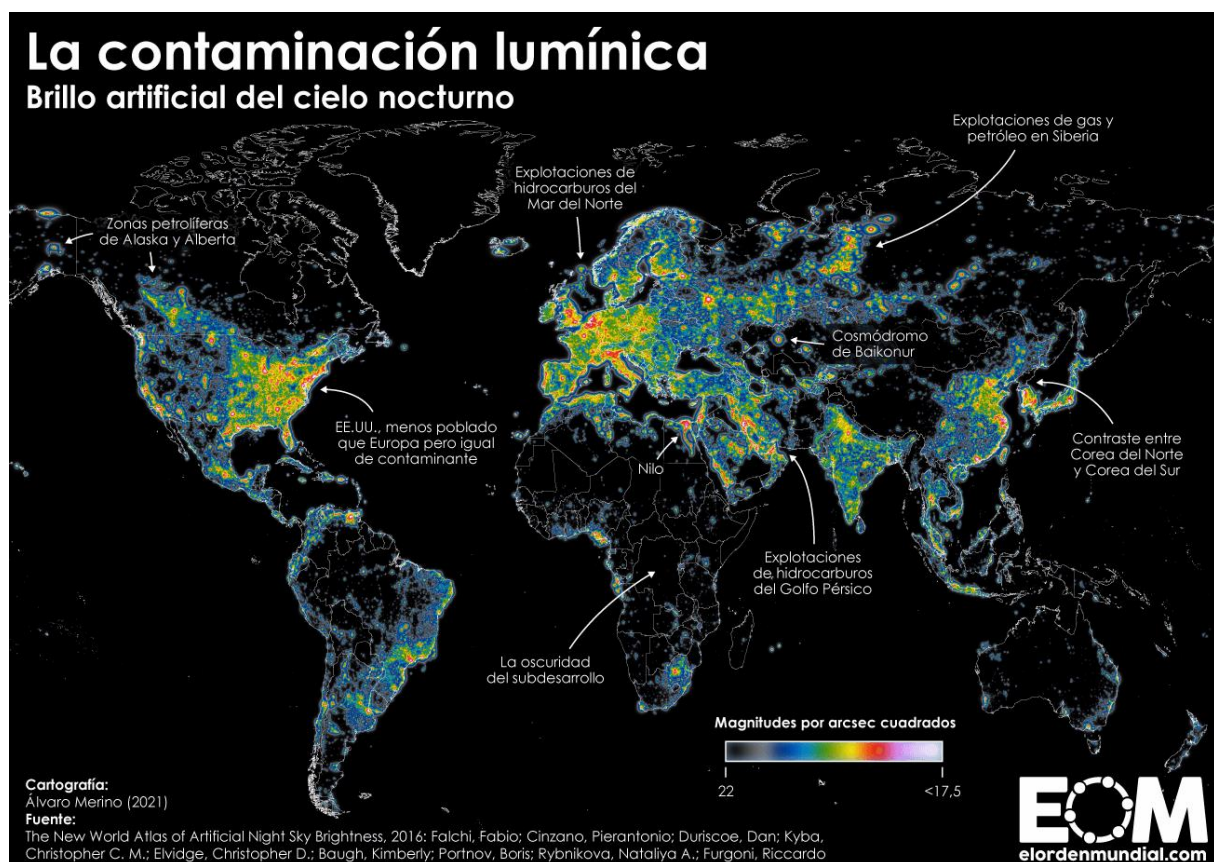


Figura 3.3.5. La contaminación lumínica en el mundo. Tomado de:
<https://elordenmundial.com/mapas/mapa-contaminacion-luminica-mundo/>

3.3.3 Agua

El agua es imprescindible para la vida, y es limitante por defecto tanto para organismos terrestres como acuáticos (no olvidar que el agua que forma parte del cuerpo de los seres vivos es dulce, independientemente del medio en que dichos seres vivos habiten). La importancia ecológica del agua estriba en un cúmulo de propiedades que le son características, como por ejemplo su alto calor específico, su alto punto de ebullición, su máxima densidad por encima del punto de solidificación (a 4 °C), su gran capacidad como disolvente y su escasa reactividad química.

Al hablar del agua como factor ambiental potencialmente limitante, se debe tener en cuenta el *régimen de precipitaciones* pluviales, la *evaporación*, la *humedad* y la *disponibilidad* de agua en la corteza terrestre.

El *régimen de precipitaciones* –cantidad y distribución estacional-, junto con la temperatura media, es una importante condicionante para la distribución geográfica de los principales *biomas* terrestres. Al ser organismos sésiles, los vegetales deben estar adaptados a la condición temperatura – precipitación del lugar en que se desarrollan, y eso es lo que define que a cada clima corresponda una vegetación (un paisaje) característico (Figura 3.3.6).

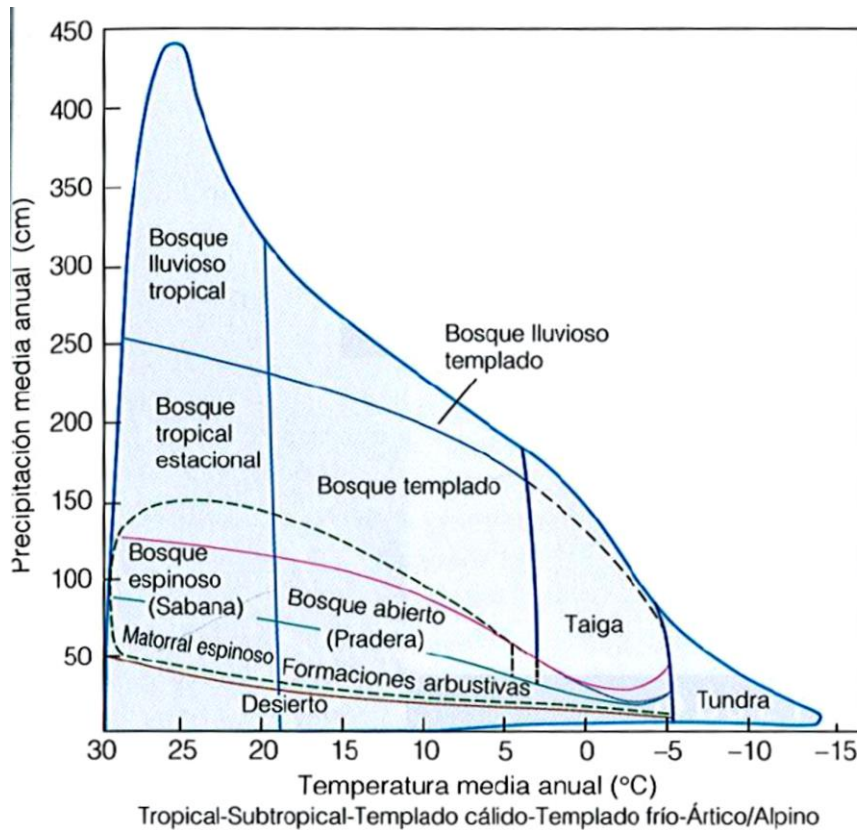


Figura 3.3.6. Relación entre biomas, precipitación y temperatura (tomado de Universidad de Oviedo, 2016)

En cuanto a **disponibilidad de agua**, al hablar del ciclo hidrológico se verá que las grandes reservas de agua dulce están en las aguas subterráneas. Éstas tienen un tiempo de renovación muy largo, lo que hace que se las considere en la práctica como recursos no renovables. A escala local, la disponibilidad del agua en el suelo condiciona fuertemente el tipo de vegetación que éste puede sostener (ver Figura 3.3.7). El hombre, como principal agente de contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, debe también responsabilizarse de corregir, recuperar, mejorar los recursos hídricos que están afectados y proteger aquellos que no lo están, para posibilitar el uso sostenible de los mismos.

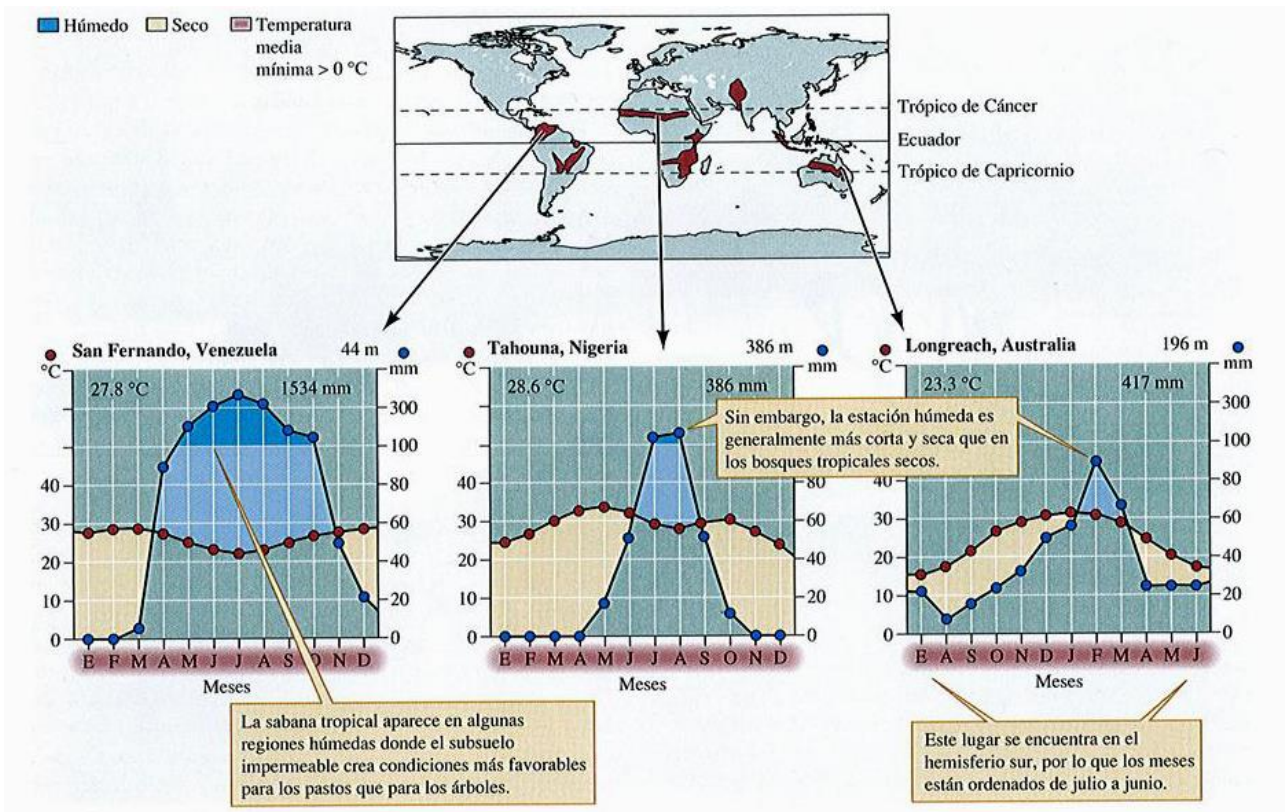


Figura 3.3.7. Relación entre precipitación y disponibilidad de agua en praderas cálidas (sabanas) (tomado de tomado de Universidad de Oviedo, 2016)

3.3.4 Oxígeno

El oxígeno molecular ocupa aproximadamente un 21 % del volumen de la atmósfera, y es esencial para la vida de la mayor parte de los seres vivos, puesto que son aerobios. Los organismos anaerobios estrictos son muy pocos en relación a los aerobios. La respiración aerobia, como reacción catabólica que proporciona energía, es más eficiente que la anaerobia, y es por ello que los organismos facultativos la prefieren, cuando tienen la opción entre respirar aeróbica o anaeróbicamente.

Para los organismos terrestres, cabe decir que los vegetales C3 y C4 tienen un comportamiento en relación al oxígeno análogo al que tienen con la temperatura o la intensidad lumínica: el exceso de oxígeno puede inhibir a los vegetales C3 pero no a los C4. A su vez, cuanto más se desciende a capas profundas en el suelo y los sedimentos, e incluso en el interior del cuerpo de grandes animales, el oxígeno puede escasear lo suficiente como para convertirse en factor limitante.

En el agua la concentración de oxígeno realmente limita las posibilidades de desarrollo de formas aerobias. Los seres vivos emplean para respirar el oxígeno molecular O_2 que está disuelto en el agua, y que se designa habitualmente como **oxígeno disuelto (OD)**.

El oxígeno es poco soluble en agua. Su concentración de saturación desciende a medida que aumenta la temperatura, y lo mismo ocurre cuando aumenta la salinidad. Para agua a 20 °C, el OD de saturación es de 8 mg/L, para 15 °C, es de 10,2 mg/L. Para que un cuerpo de agua se considere en fase aerobia y pueda sostener formas superiores de vida -peces- debe contener un tenor de OD mayor o igual a 5

mg/L. Este valor es habitual en la bibliografía, pero además, en nuestro país es el valor que menciona la legislación vigente de calidad de aguas -Decreto 253/979 y sus modificaciones-).

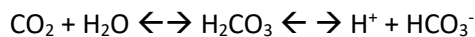
El OD en un cuerpo de agua proviene de dos fuentes: la difusión superficial y la fotosíntesis de los organismos acuáticos. El consumo de oxígeno se asocia con funciones vitales de distintos seres vivos, entre ellas la degradación de materia orgánica, la respiración de organismos aerobios fotosintéticos en ausencia de luz y la de organismos aerobios quimiosintéticos.

Es de esperar que ocurran naturalmente fluctuaciones, tanto estacionales como espaciales y diarias, en las concentraciones de OD en un cuerpo de agua, de acuerdo con las características del cuerpo de agua, con la biota que lo habita y con el fotoperíodo. También pueden ocurrir episodios de mortandad de peces en olas de calor en que la temperatura del agua permanece en forma prolongada por encima de sus valores habituales, ya que el OD baja y genera una condición de estrés que se suma al estrés térmico ocasionado por la alta temperatura del agua.

3.3.5 Dióxido de carbono

Es uno de los componentes naturales de la atmósfera, en la que se encuentra en proporciones bajas, pero sostenidamente crecientes. Para los organismos de vida terrestre –y muchas veces también para los organismos de vida acuática- puede constituirse en limitante por exceso. En agua es mucho más soluble que el oxígeno.

Se genera en grandes cantidades como producto de la respiración y de procesos de degradación de materia orgánica. Se puede escribir una ecuación de equilibrio entre el dióxido de carbono molecular y el ion bicarbonato en medio acuoso:



Como máximo, dos de estas especies químicas pueden coexistir, pero no las tres. Las especies que pueden estar presentes dependen del pH del medio (ver Figura 3.3.8).

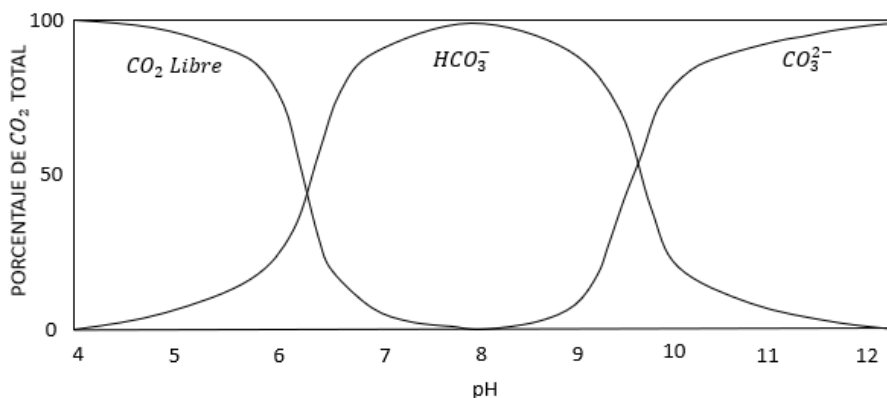


Figura 3.3.8. Porcentaje de CO₂ total en cada una de las formas que se presenta en agua en función del pH (elaboración propia a partir de bibliografía)

Durante el día los organismos fotosintéticos consumen CO₂ para cumplir sus funciones vitales, por lo que el equilibrio tiende a desplazarse hacia la izquierda para reponerlo. Por lo tanto, hay consumo de iones H⁺ y en consecuencia ocurre un incremento del pH del medio. Inversamente, durante la noche los organismos fotosintéticos respiran liberando CO₂ al igual que los heterótrofos, y en esas condiciones el restablecimiento del equilibrio exige que la reacción se desplace hacia la derecha para

consumir el exceso de CO_2 . En tales condiciones también se forma H^+ y en consecuencia el pH del medio tiende a decrecer (Figura 3.3.9).

Si bien el sistema carbonato–bicarbonato es muy importante en la capacidad buffer o amortiguadora del agua y ofrece resistencia a los cambios bruscos en el pH del medio, en determinadas condiciones –por ejemplo, en episodios de crecimiento explosivo de algas- las fluctuaciones en el pH y en el OD que se producen en el ciclo diario por alternancia entre fotosíntesis y respiración pueden llegar a condicionar las posibilidades de supervivencia de muchos seres vivos.

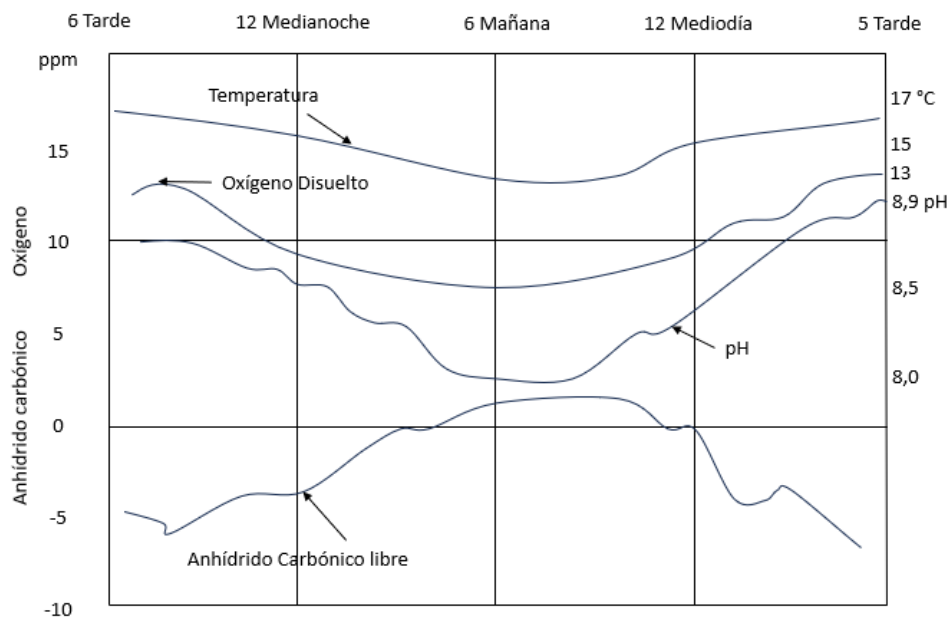


Figura 3.3.9. Ciclo diario de variación temperatura, oxígeno disuelto, pH y CO_2 en un lago eutrófico (elaboración propia)

3.3.6 Nutrientes

Más de la mitad de los elementos químicos son, en distintas cantidades, necesarios para la vida. Algunos, que se requieren en grandes cantidades, reciben el nombre de **macronutrientes**, como por ejemplo carbono, oxígeno, nitrógeno, entre otros; otros sólo son requeridos en pequeñas cantidades (e incluso no por todos los organismos por igual), y reciben el nombre de **micronutrientes** u **oligonutrientes**. En general, la existencia o no en cantidades suficientes de una sustancia nutritiva puede definir las posibilidades de subsistencia de determinados organismos en el medio.

Desde el punto de vista de la contaminación de cuerpos de agua, los nutrientes que revisten mayor interés son el **nitrógeno** y el **fósforo**. A los efectos de atacar un problema de contaminación eutrófica o de gestionar una cuenca para evitar que este tipo de episodios ocurra, es muy importante conocer cuál es el nutriente limitante para el desarrollo de los organismos productores. Ante cantidades suficientes de nitrógeno y fósforo como para que ocurra un fenómeno de eutroficación, se asume que la relación entre las concentraciones de ambos elementos en el agua y la relación en que son requeridos por los seres vivos, son las que definen cuál de ellos puede ser el limitante en cada caso particular.

De todos modos, aun ante cantidades suficientes de nutrientes para que ocurran fenómenos de crecimiento explosivo de algas, éstos pueden no ocurrir; en tales casos, lo que suele ocurrir es que el

factor limitante no es la disponibilidad de nutrientes, sino algún otro factor ambiental como la turbiedad, la salinidad, el oxígeno, la temperatura, etc.

3.3.7 Suelos

Se designa como **suelo** a la capa intemperizada de la corteza terrestre, junto con los organismos vivos que lo habitan y los productos en descomposición que hay en él. Puede considerarse como un ecosistema que funciona en base a las cadenas de detritos. Separar los elementos bióticos de los abióticos en un suelo no es tan sencillo, pues están ocurriendo permanentemente procesos de descomposición de materia orgánica que generan una fuerte interacción entre los organismos y sus productos, y el sustrato en que estos procesos tienen lugar.

Los materiales presentes en el suelo pueden diferenciarse en *orgánicos* e *inorgánicos*. La fracción *orgánica* está constituida por los compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, etc., que constituyen el alimento de los microorganismos presentes en el suelo. La fracción *inorgánica* está compuesta por distintos tipos de minerales que, dependiendo del tamaño de las partículas, indican el tipo de roca a partir de la cual se formó el suelo.

La profundidad del suelo puede variar desde unos pocos centímetros hasta varios metros. Un corte en vertical de un suelo permite reconocer tres **horizontes** principales, que se designan como A, B y C (Figura 3.3.10); la roca madre inalterada no se considera como parte del suelo propiamente dicho, sino como subsuelo (es lo que se representa en la carta geológica y no en la carta edafológica o de suelos).



Figura 3.3.10. Estructura vertical del suelo. Las capas pueden variar en número, composición y espesor (tomado de Enkerlin et al., 1997)

Aunque muchas veces no se le da demasiada importancia al suelo como factor limitante, es indiscutible que sus características físicas y químicas condicionan fuertemente el tipo de formas vivas que puede sostener, tanto desde el punto de vista de los organismos que habitan en él como de los vegetales que puedan desarrollarse empleándolo como sustrato. Entre las propiedades del suelo que más se relacionan con su capacidad de sostener vida y por ende con su potencial de actuar como factor ambientalmente limitante para el desarrollo de ésta, se cuentan su **contenido de materia orgánica** y

su **capacidad de retención de agua**. Esas propiedades están a su vez vinculadas a la textura, porosidad y permeabilidad del suelo, así como a su pH y capacidad de intercambio iónico.

El **horizonte A**, que es el superior, consta de cuerpos muertos de vegetales y animales que están siendo degradados a materia orgánica finamente dividida en un proceso de *humificación*. A su vez, dentro del propio horizonte A se puede reconocer una zona superior de hojarasca, que es donde está la materia más fresca y donde eventualmente el origen de la materia orgánica muerta todavía podría ser visualmente reconocible; luego una zona de humus, donde se están formando estas macromoléculas orgánicas (los compuestos húmicos) que luego tienen mucho que ver con la fertilidad del suelo, ya que es una zona de nutrientes disponibles; y por último una zona inferior de lixiviación, donde los compuestos húmicos van pasando a capas inferiores –en concreto, al horizonte B-. A modo de ejemplo, en una pradera la zona de hojarasca es muy pequeña pero la zona de humus es una columna importante; mientras que en un bosque, la zona de hojarasca suele tener mayor espesor pero la zona de humus es muy poco profunda.

En el **horizonte B** ocurren procesos de *mineralización*. Los compuestos orgánicos que han emigrado desde el horizonte A, ya sea por depósito o por lixiviación, están pasando a inorgánicos por acción de organismos desintegradores y se van mezclando con la materia geológica madre.

El **horizonte C** considera la materia madre más o menos invariada químicamente, que sufre distintos procesos de meteorización.

Clasificación de suelos del Uruguay

Los suelos admiten ser clasificados de acuerdo a diferentes criterios, en función de sus características fisicoquímicas o de sus usos potenciales. En nuestro país los suelos han sido clasificados de acuerdo con sus características fisicoquímicas pero también a través de un índice nacional, el índice CONEAT, que los clasifica en función de su aptitud productiva para ganado en pie en ciertas condiciones.

La *Carta de Suelos* o Carta Edafológica (ver Figura 3.3.11 y Figura 3.3.12) brinda principalmente información sobre las características del horizonte A, relacionándolo con el horizonte B que lo sustenta. La clasificación que presenta esta Carta atiende fundamentalmente las características morfológicas y el proceso de formación de los suelos. Las características principales de los suelos de nuestro país de acuerdo con su orden se indican en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características principales de los Órdenes y Grandes Grupos de suelos del Uruguay (RENARE-MGAP)

| Orden | Grandes Grupos | Características principales |
|-------|--|--|
| I | Suelos poco desarrollados Litosoles, Arenosoles, Fluvisoles, Inceptisoles | Son suelos poco profundos –pocos cm de espesor- no necesariamente jóvenes, de baja fertilidad, pedregosos y rocosos. No son cultivables. |
| II | Suelos melánicos Brunosoles, Vertisoles | Suelos profundos, muy fértiles, con elevado contenido de materia orgánica (tierras negras). Alta saturación de bases. Textura media a pesada. |
| III | Suelos saturados lixiviados Argisoles, Planosoles | Suelos de baja permeabilidad. Gran diferenciación textural, por lixiviación de arcillas. Alta saturación en bases. Baja permeabilidad. |
| IV | Suelos desaturados lixiviados Luvisoles, Acrisoles | Presentan fuerte proceso de lixiviación con acidificación del perfil por lavado de bases (pH del horizonte B del orden de 5,5). Bajo contenido de materia orgánica. Baja relación Ca/Mg. Bajo tenor de bases. Considerable cantidad de aluminio (> 5 %). |

| Orden | Grandes Grupos | Características principales |
|-------|---|--|
| V | Suelos halomórficos Solonetz, Solonetz Solodizados, Solods | Son suelos con alto contenido de sodio intercambiable. Poco favorables para el desarrollo de plantas. |
| VI | Suelos hidromórficos Gleysoles, Histosoles | Son suelos sometidos a exceso de agua en forma temporal o permanente. Se localizan en zonas bajas e inundables. Presentan acumulación de materia orgánica de tipo turboso. |

En la Figura 3.3.11 se presenta la carta edafológica según la clasificación universal de suelos y en la Figura 3.3.12, de acuerdo con la clasificación en órdenes, grandes grupos, grupos y subgrupos.

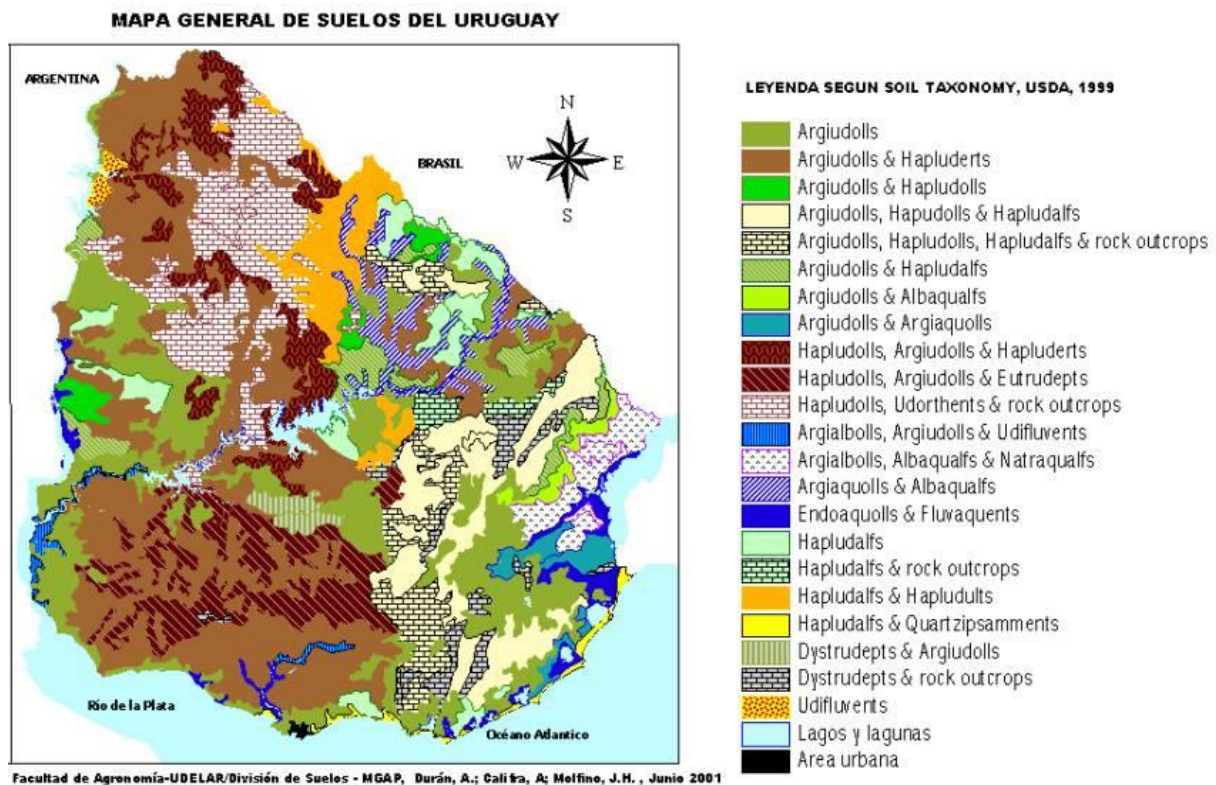


Figura 3.3.11. Carta de suelos del Uruguay según la clasificación universal de suelos (tomada de <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/carta-suelos-del-uruguay-segun-soil-taxonomy>)

Entre 1963 y 1967, la Comisión de Inversiones y Desarrollo Económico (CIDE) realizó una carta de Zonas de Uso y Manejo de los Suelos del Uruguay, que se presenta en la Figura 3.3.13.

En 1968 se crea la Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra CONEAT, en el marco del entonces Ministerio de Ganadería y Agricultura, y se le encomienda realizar, a partir de la zonificación la CIDE, una clasificación de suelos más detallada con fines tributarios y legales. Esto llevó a la instauración del hoy conocido como Índice CONEAT.

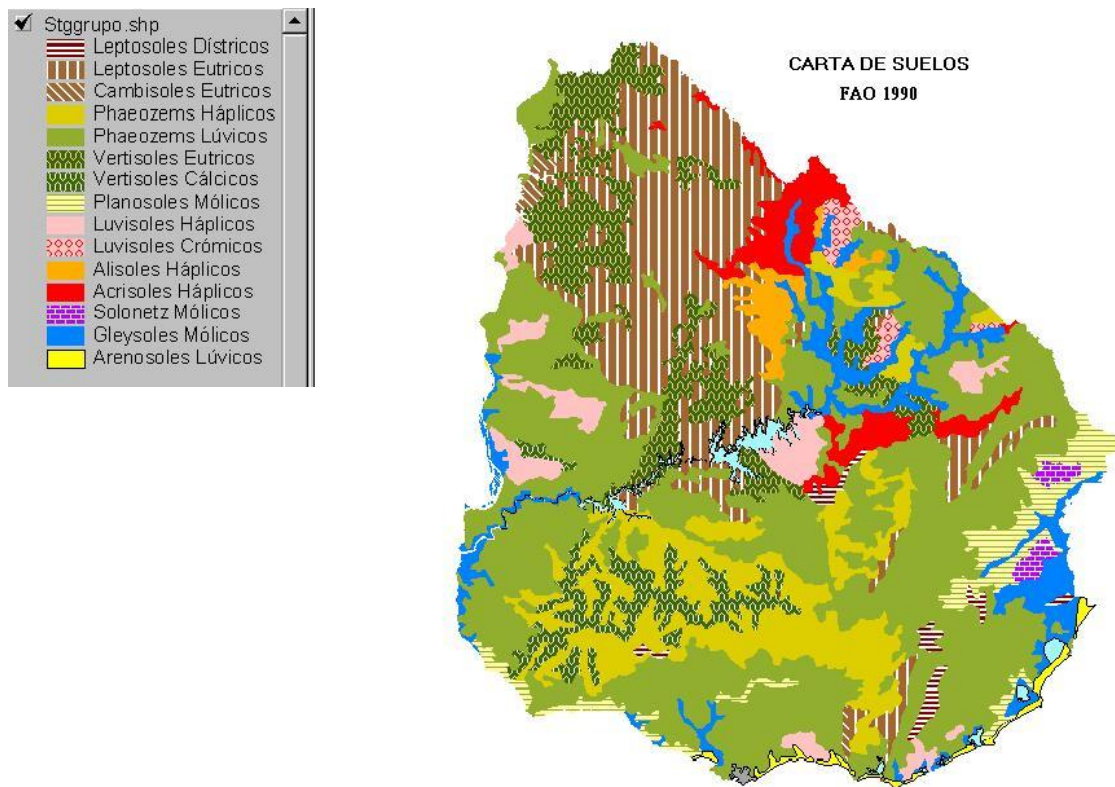


Figura 3.3.12. Carta de suelos del Uruguay según suelos dominantes (tomada de Ibáñez, 2008)

Dado que el objetivo era definir normas técnicas para fijar la capacidad productiva de cada inmueble, el criterio que se decide adoptar (Índice de Productividad conocido como **Índice CONEAT**) es la **capacidad productiva del padrón en términos de lana y carne bovina y ovina en pie y a campo natural, en relación a la capacidad productiva media del país en los mismos términos.**

A la capacidad productiva media a nivel nacional se le asigna un **valor de referencia** igual a **100**. Luego, valores mayores o menores indicarán suelos más o menos productivos que la media nacional respectivamente. CONEAT identifica 185 Grupos de unidades de suelos (no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelo, sino áreas homogéneas de acuerdo con su capacidad productiva, es decir, áreas con un mismo valor de índice CONEAT). La notación CONEAT está basada en la clasificación de la CIDE, por lo que su primer código (por ejemplo, 1.23, 5.01a, etc.) se refiere a la zona CIDE correspondiente.

Desde el punto de vista edafológico, la **productividad** se considera como la **capacidad inicial del suelo para producir un cierto rendimiento por hectárea y por año**, que teóricamente se puede expresar como porcentaje del rendimiento óptimo que se obtiene en el suelo en las condiciones más favorables, bajo cierta tecnología definida. Esta definición de **productividad** implica un concepto **potencial** y abarca a **todos los rubros agropecuarios**; para estimarla existe una metodología definida, aplicable en función de la disponibilidad de información para todos los rubros.

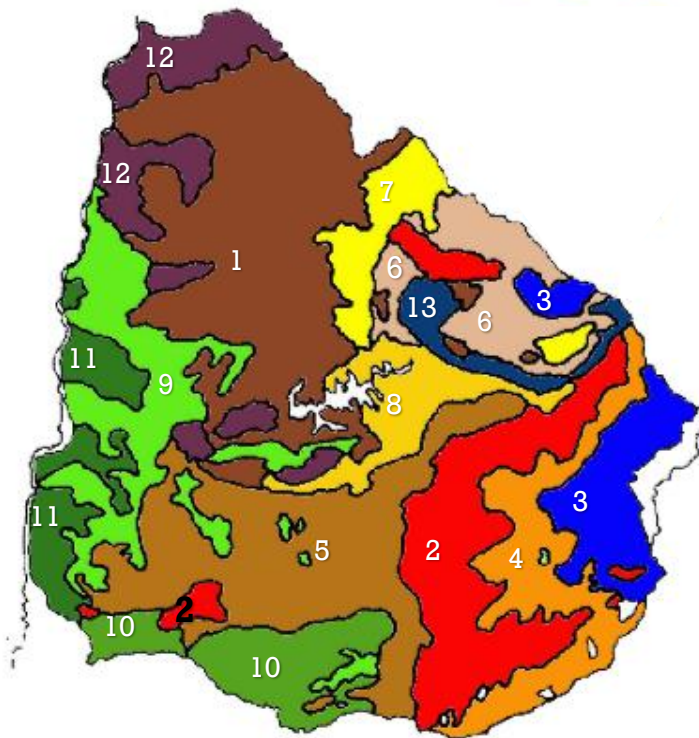


Figura 3.3.13. Zonas de uso y manejo de suelos del Uruguay según CIDE (1967)

| Zona CIDE | Principales características |
|-----------|---|
| 1 | Suelos basálticos. Uso pastoril. |
| 2 | Paisaje de sierras, con afloramientos rocosos de densidad variable y colinas. Pradera con tapiz ralo, con matorrales y monte serrano en las sierras y con tapiz denso en las colinas. |
| 3 | Bañados y esteros permanente o temporariamente inundados y llanuras medias. Uso arrocero y pastoril. |
| 4 | Colinas poco rocosas. Suelos profundos. Fertilidad media a baja. Uso pastoril. |
| 5 | Colinas y lomas fuertes. Suelos moderadamente profundos y superficiales. |
| 6 | Suelos moderadamente profundos. Horizonte superficial con poca agregación (alto riesgo de erosión). Uso pastoril de ciclo completo. |
| 7 | Los suelos más profundos del país y los más pobres, con problemas de toxicidad por aluminio. |
| 8 | Suelos de texturas arenosas y fertilidad baja. Baja producción en invierno. Uso ganadero de ciclo completo. Prioridad forestal. |
| 9 | A partir de sedimentos de texturas gruesas. Prioridad forestal |
| 10 | Suelos de buena fertilidad, profundos y con buena aptitud agrícola. Uso agrícola pastoril. |
| 11 | Laderas de pendiente fuerte en el litoral oeste. |
| 12 | Suelos moderadamente drenados, de fertilidad natural muy alta, con grado variable de rocosidad. |
| 13 | Suelos de texturas medias y finas, de buena fertilidad, en general pesados, con buena o muy buena aptitud agrícola. |

La carta de aptitud de uso de los suelos de nuestro país a partir de los valores del Índice CONEAT se presenta en la Figura 3.3.14.

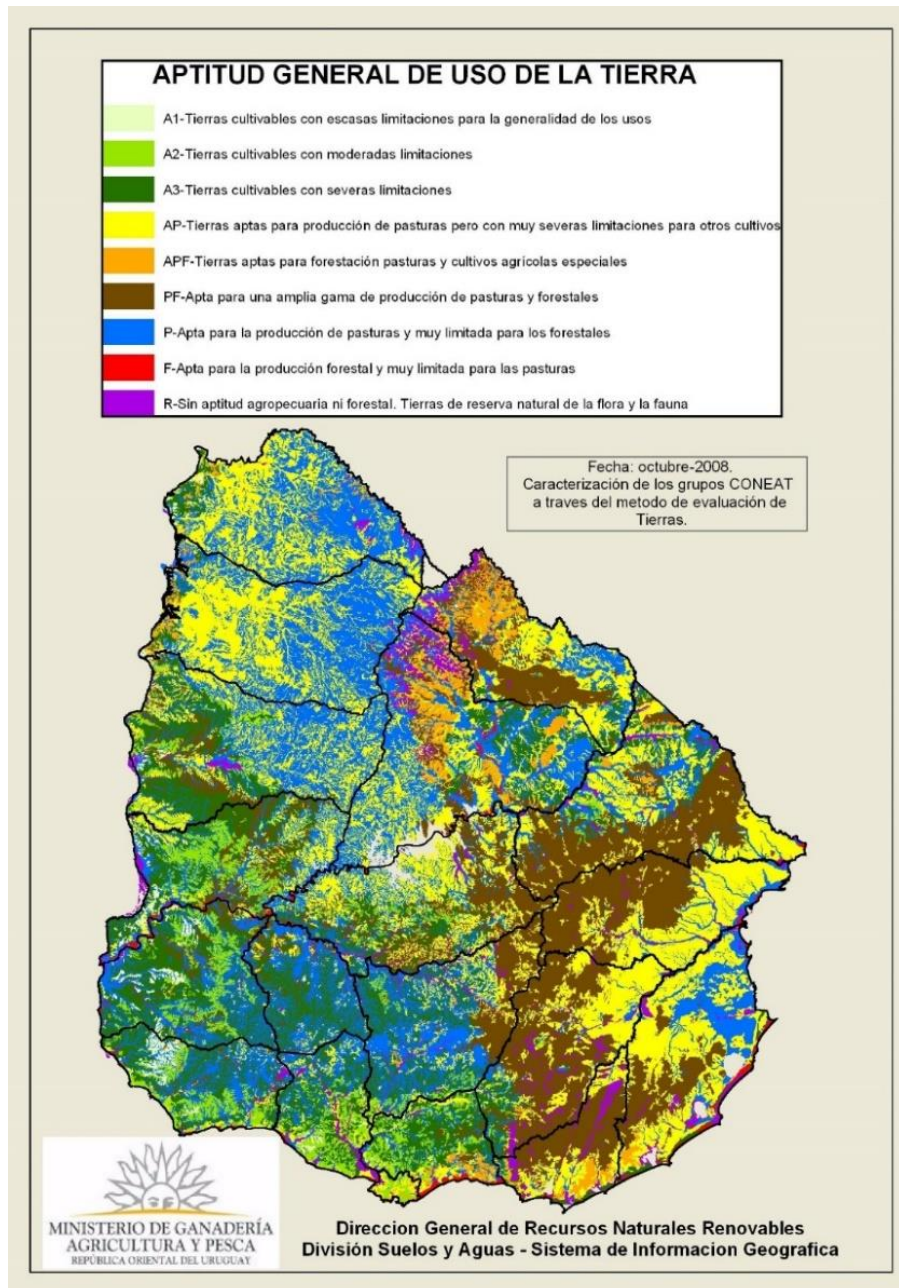


Figura 3.3.14. Carta de aptitud general de uso de la tierra en Uruguay (RENARE-MGAP, 2008)

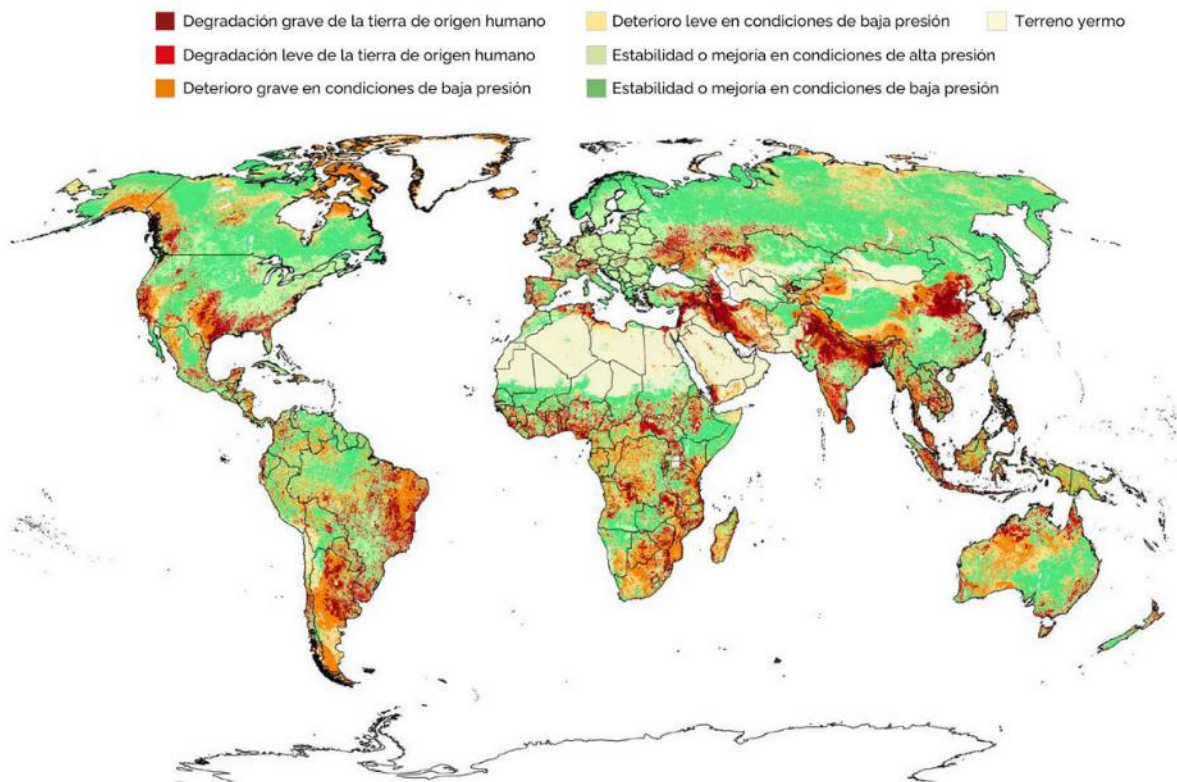
Degradación y contaminación de suelos

Los procesos por los cuales un suelo puede perder paulatinamente su aptitud para un determinado uso pueden categorizarse como procesos de *degradación* o de *contaminación*.

Los procesos de **contaminación** suelen aludir a una **relación causa-efecto directa** (una práctica o acción cuyo resultado o producto es la reducción de la aptitud del suelo para cierto uso, como por ejemplo el vertimiento de determinados tipos de residuos en un determinado lugar; **no** implica intencionalidad sino, simplemente, la ocurrencia de una consecuencia directa). Así, la disposición de residuos sólidos, vertidos o derrames de productos químicos, infiltración al terreno de líquidos contaminantes, son ejemplos de posibles procesos de contaminación de suelos. Vale la pena mencionar que, en presencia de suelos contaminados, se incrementa la probabilidad de contaminar los cuerpos de aguas superficiales cercanos y las aguas subterráneas.

En cambio, cuando se habla de procesos de **degradación**, el deterioro ocurre como un **efecto indirecto** asociado a una acción o práctica realizada con otro fin como, por ejemplo, la agricultura. Entre las principales formas de **degradación física** de suelos cabe citar la compactación, la anegación, la erosión y la quema. Entre los procesos de **degradación química** se cuentan la salinización, la acidificación y la pérdida de fertilidad.

En la Figura 3.3.15 se muestran las tendencias de degradación y deterioro de suelos a nivel mundial según la FAO, actualizadas a 2021.



Nota: Distribución global de la degradación de la tierra expresada como tendencia general combinada con las presiones acumuladas causadas directamente por el hombre. La degradación inducida por el hombre se refiere a una tendencia negativa causada por la actividad humana. Deterioro se refiere a la tendencia negativa causada por fenómenos naturales o por la acción humana donde el estado es malo.

Fuente: Coppus, próxima publicación, modificado conforme UN, 2021.

Figura 3.3.15. Procesos de degradación de suelos a nivel mundial según la FAO (Tomado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/de4b9d76-34c0-4a54-ba5a-a4d84f89c3da/content/src/html/chapter-1-2.html>)

Procesos de degradación física

Compactación

La compactación se refiere al *incremento de la densidad* de un suelo como resultado de una pérdida de porosidad. Al perderse espacios libres entre las partículas del suelo, se reducen los contenidos de aire y agua del suelo, así como sus posibilidades reales de circulación; esto puede condicionar la supervivencia de parte de la biota del suelo.

Las causas principales de la degradación de suelos por compactación son mecánicas: tránsito de maquinaria pesada agrícola o forestal, tránsito de maquinaria en obra por zonas no preparadas para ello, pisoteo de ganado por tránsito o sobrepastoreo.

Anegación

La anegación de suelos es la *inundación temporal o permanente* por aguas fluviales o pluviales, como consecuencia de intervenciones humanas que modifican los sistemas de drenaje natural. Suele aparecer como consecuencia no deseada en intervenciones de ingeniería en las que los drenajes diseñados resultan superados en su capacidad en eventos puntualmente intensos. Las posibilidades de uso de terrenos que resultan anegados con cierta frecuencia son bastante restringidas. En particular, cuando se trata de las planicies de inundación de cursos de agua que discurren por tramos urbanos, debe realizarse el mayor esfuerzo para evitar la instalación de viviendas allí.

En la construcción de tajamares y represas, los terrenos se inundan a conciencia y adoptando las precauciones necesarias para minimizar efectos adversos, pero, por cierto, los suelos involucrados dejan de ser aplicables para otros usos.

Quema

La quema es una práctica que se realiza para efectuar limpiezas rápidas de los terrenos (Figura 3.3.15). A corto plazo puede aumentar la fertilidad del suelo, por incorporación de cenizas que aumentan el potasio y calcio disponible en el suelo. Pero el impacto negativo causado por la quema puede ser significativo en el mediano y largo plazo: la materia orgánica en la superficie del suelo se oxida (se quema), desaparecen bacterias y pequeños animales presentes en el suelo, se modifica la textura, se pierde porosidad, aumenta la erosión con la consecuente pérdida de fertilidad, etc.

Además de la prohibición que cada año rige en el territorio nacional acerca de quemar a cielo abierto durante la temporada estival, no está permitido quemar para limpiar el terreno para obras civiles ni para realizar tareas de mantenimiento. Está también explícitamente prohibido como forma de realizar limpiezas en la faja pública de carreteras o para reducir el volumen de residuos sólidos a disponer en una obra.



Figura 3.3.16. Zafra caña de azúcar 2012 en Bella Unión, Uruguay (tomado de <https://www.presidencia.gub.uy/sala-de-medios/fotografias/alur-cana-azucar-bella-union-zafra-2012>)

Erosión

La erosión es un proceso de *desprendimiento y arrastre de partículas de las capas superiores de un suelo*. Con las partículas finas de las capas superiores, se pierden también los nutrientes del suelo que están adsorbidos en ellas y la capacidad de retención de agua; si el proceso erosivo avanza, esto puede redundar en un proceso de desertificación. Si bien se trata de un *proceso natural*, las actividades humanas pueden incrementar su intensidad y aumentar las áreas afectadas. Un suelo desnudo o ya erosionado es mucho más susceptible a facilitar el avance de la erosión. Los suelos pedregosos o de granulometría gruesa denotan el resultado de un proceso erosivo, pasado o presente.

Los agentes directamente responsables en los procesos erosivos son el viento y el agua, por lo que se habla de *erosión eólica* y de *erosión hídrica*. La *erosión eólica* ocurre en áreas sometidas a la acción sostenida del viento sobre terrenos que carecen de vegetación cuyas raíces fijen el suelo y cuya presencia lo proteja. En Uruguay los procesos de erosión eólica son cuantitativamente despreciables, no así los de erosión hídrica. La *erosión hídrica* se suele ver intensificada ante intervenciones humanas que modifican el funcionamiento de los sistemas naturales (por ejemplo, erosión aguas abajo del vertedero de una represa, erosión costera en zonas de playas).

La erosión de los suelos puede resultar también en afectaciones a cuerpos de agua cercanos, entre las que se encuentra el aterramiento, disminución del volumen útil de lagos y embalses, etc., que pueden a su vez ocasionar inundaciones y alteraciones del ecosistema natural.

La cobertura del suelo juega un rol muy importante en los procesos erosivos, favoreciéndolos o evitándolos; por ejemplo, el mantillo y la vegetación colaboran a disipar la energía de las gotas de agua de lluvia y por ende a evitar / reducir la erosión. Además de la cobertura vegetal del suelo, otros factores que inciden en los procesos erosivos son: la cantidad e intensidad de lluvias; la estructura geológica del terreno; la granulometría del suelo; la pendiente.

Las *principales causas antropogénicas* de la erosión a nivel mundial son el sobrepastoreo y la agricultura. El *control* de la erosión está relacionado no sólo con el uso sostenible del suelo, sino también con la protección de la cobertura vegetal, el control del escurrimiento de las aguas, la reforestación de áreas degradadas, etc.

Procesos de degradación química

Salinización

Aunque los procesos de *salinización / alcalinización* de suelos pueden ocurrir de forma natural, al hablar de un proceso de *degradación* está implícita una actividad humana de la que es una consecuencia no deseada. La salinización natural ocurre como consecuencia del transporte / escurrimiento de aguas hacia un terreno topográficamente deprimido o cuando el nivel freático está muy cerca de la superficie, ya que, al evaporarse el agua, las sales que se encontraban disueltas en ella quedan depositadas en las capas superficiales del suelo. En regiones áridas, donde los procesos de evaporación son intensos, existe una alta probabilidad de que las capas superiores del suelo sufran procesos de salinización.

Las prácticas agrícolas pueden fomentar una extracción selectiva de algunas sustancias y la concentración de otras. El agua de riego transporta un cierto contenido de sales (que suele ser mucho mayor cuando se emplean aguas subterráneas en vez de superficiales) que puede depositarse superficialmente como resultado de la evaporación del agua que o no fue aprovechada o no penetró en el suelo –especialmente en el riego por inundación y por tablares-.

Cuando el proceso de salinización de un suelo se traduce en el incremento de su contenido de sodio en más del 15 % de su *Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)* (es decir, de la cantidad de cationes que pueden retener las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo), puede ser necesario aplicar medidas de remediación específicas, ya que un suelo con baja CIC indica poca capacidad de retener nutrientes, es decir, se trata de un suelo pobre en materia orgánica.

Acidificación

La **acidificación** de suelos es una de las consecuencias de la lluvia y deposición ácidas; también puede ser producto de prácticas de fertilización inadecuadas o de extracción selectiva de nutrientes, en particular de aquellos que tienen que ver con la alcalinidad de los suelos.

El descenso en el pH de los suelos, que dependerá fundamentalmente de la constitución de los mismos además del agente o proceso al que se ve sometido, facilita la liberación de metales pesados, que son mayoritariamente tóxicos para los vegetales y para los diferentes seres vivos que integran el ecosistema del suelo. Esto agrega otra posible limitante para las formas de vida que se desarrollarán como parte de la biota del suelo en sí mismo y para las que éste será capaz de sostener. La acidificación también puede conducir al agotamiento de un suelo y a cambios en los procesos de crecimiento de los vegetales establecidos allí.

Cuando es necesario proceder a la neutralización de suelos, hay diferentes posibilidades que deben ser analizadas en cada caso por los especialistas correspondientes. Algunas medidas a considerar suelen comprender agregado de enmiendas, como cenizas, cal, estiércol, efluentes, entre otras.

Pérdida de fertilidad

La **fertilidad** del suelo es la **capacidad** de éste **de sostener el crecimiento de vegetales**. Se relaciona con su **capacidad de producir** en general (no en el sentido estricto de *productividad* que se maneja en términos ecológicos y que se presenta en la sección 3.4.2 de estas notas). Desde el punto de vista edafológico, el concepto de **productividad**⁸ se ha presentado antes en esta misma sección de estas notas.

La **fertilidad** es función de muchos factores, entre los que se cuentan las **características físicas del suelo** (porosidad, permeabilidad, textura), la **composición química** (las cantidades de los diferentes nutrientes), el **contenido de materia orgánica**, el **contenido de microorganismos y organismos inferiores** que participan directa o indirectamente en el sustento de formas vivas sobre el suelo.

⁸ Como se indicó en la p.35, la productividad se considera como la capacidad inicial del suelo para producir un cierto rendimiento por hectárea y por año, que teóricamente se puede expresar como porcentaje del rendimiento óptimo que se obtiene en el suelo en las condiciones más favorables, bajo cierta tecnología definida. Esto implica un concepto *potencial* y abarca a *todos los rubros agropecuarios* y no solamente los que considera el Índice CONEAT.

La **pérdida de fertilidad** es la **reducción o agotamiento de los elementos nutritivos del suelo**, causada en general por el cultivo de suelos poco aptos para el uso que se ejerce, la sobreexplotación agrícola, la permanencia de un monocultivo sin rotación, etc., sin reposición de los nutrientes que se van extrayendo. La pérdida de materia orgánica del suelo es una forma de pérdida de fertilidad, en general como consecuencia de procesos de degradación física y química asociados con deforestación, sobrepastoreo, prácticas agrícolas inadecuadas, quema de residuos o de vegetación.

Cuando la **pérdida de fertilidad alcanza un 10 % medido desde la productividad agrícola** del suelo, se habla de un **proceso de desertificación**. Se habla de desertificación *moderada* cuando esa caída se sitúa entre el 10 % y el 25 %, mientras que entre el 25 % y el 50 % se habla de desertificación *severa*. Cuando la pérdida de productividad agrícola supera el 50 % (desertificación *muy severa*) el proceso es casi imposible de revertir. La manifestación más clara es la desaparición o reducción ostensible de la cubierta vegetal, que deja el suelo desnudo y a veces la roca madre aflorando.

Desertización y desertificación

La **desertización** es el proceso evolutivo **natural** de una región hacia unas condiciones morfológicas, climáticas y ambientales conocidas como **desierto**. Se produce sin intervención humana, aunque las actividades antrópicas pueden acelerar e intensificar el proceso, a través de prácticas que faciliten el empobrecimiento de suelos. Los factores que causan la desertización son diversos, entre ellos factores geomorfológicos y dinámicos (relacionados con la actividad geológica de la Tierra). Las zonas más próximas a desiertos son muy proclives a sufrir desertización.

La **desertificación** es un proceso de degradación en el que las tierras fértiles pierden total o parcialmente el potencial de producción. En 1997, la Conferencia de Nairobi la definió como:

“Agravamiento o extensión de las condiciones características del desierto; proceso que acarrea una disminución de la productividad biológica y con ello una reducción de la biomasa vegetal, de la capacidad de las tierras para las actividades pecuarias, de la producción agrícola y una degradación de las condiciones de vida para el ser humano.”

Según datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el 35 % de la superficie de los continentes puede considerarse como área desértica. Entre las principales **causas inmediatas actuales** de la desertificación, se cuentan las siguientes:

- Explotación agrícola no sostenible: sobreexplotación del suelo, reducción del tiempo de barbecho de las tierras cultivadas, uso descontrolado del fuego como práctica de limpieza, entre otras prácticas agrícolas inadecuadas.
- Sobrepastoreo.
- Deforestación, explotación excesiva de los recursos madereros (en particular, leña).
- Sistemas de riego y modificaciones de los drenajes y escurrimientos naturales con escaso estudio / planificación.

Entre las principales **causas estructurales** de la desertificación, cabe anotar:

- Otros cambios de uso del suelo especialmente cuando se trata de intervenciones no planificadas / estudiadas debidamente.

- Pobreza extrema -entendida como ausencia de opciones- e inequidad en la distribución de los recursos. Ante la falta de alternativas razonables, las poblaciones sobreexplotan los recursos naturales a los que tienen acceso, impulsando un círculo vicioso de aceleración de la degradación de las tierras y mayor pobreza. La degradación de las tierras también debilita las poblaciones y las instituciones, haciéndolas más vulnerables a los factores económicos globales.

En 2015 la ONU advirtió que resulta prioritario observar con mayor atención las **consecuencias de la desertificación**, “(...) cuyos efectos sobre la paz, la seguridad y la estabilidad son invisibles pero, sin embargo, una realidad para los países con escasez de agua y de comida, y cuyos habitantes se ven obligados a emigrar como consecuencia de este problema”.

Advirtió además que:

“...cerca de 1.000 millones de personas carecen de una nutrición adecuada, y las personas que viven de las tierras degradadas se encuentran entre las más afectadas. La situación de éstas podría empeorar si la degradación de las tierras, según se prevé, llegara a reducir la producción mundial de alimentos en un 12 % para 2035”.

Se estima que, en el 2050, cerca del 50 % de la tierra agrícola de América Latina estará involucrada en procesos de desertificación.

Adicionalmente, la desertificación incrementa el impacto de las catástrofes, las amenazas a la sostenibilidad de la alimentación mundial, los riesgos de propagación de enfermedades infecciosas (por migraciones masivas desde las zonas en proceso de desertificación) y de enfermedades de transmisión hídrica (ante la inminente reducción del recurso).

Situación de Uruguay

El principal proceso de degradación de suelos en Uruguay es la erosión, en particular la erosión hídrica. La pérdida de suelos ocurre cuando las pérdidas dejan de poder compensarse a través de la tasa natural de formación de suelos.

Entre los factores que incrementan el riesgo de erosión, cabe mencionar la pendiente del terreno y la profundidad y textura/granulometría del suelo. La cobertura vegetal tiene también una gran incidencia en la cantidad de nutrientes y de suelo que se pierden. Concretamente, la causa de más del 87 % de la erosión antrópica en nuestro país es la realización de prácticas inadecuadas en la agricultura (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Principales causas de la erosión hídrica en Uruguay (tomado de GEO Uruguay 2008)

| Superficie del Uruguay Total: 174 213 km ² | Cultivos | Pastoreo | Deforestación | Otros | Total |
|---|-------------|------------|---------------|------------|---------------|
| Superficie afectada (km ²) | 45.631 | 6.244 | 354 | 133 | 52.362 |
| Participación por fuente en la superficie afectada (%) | 87,1 % | 11,9 % | 0,7 % | 0,3 % | 100 % |
| Participación por fuente en el territorio nacional (%) | 26 % | 4 % | 0 % | 0 % | 30 % |

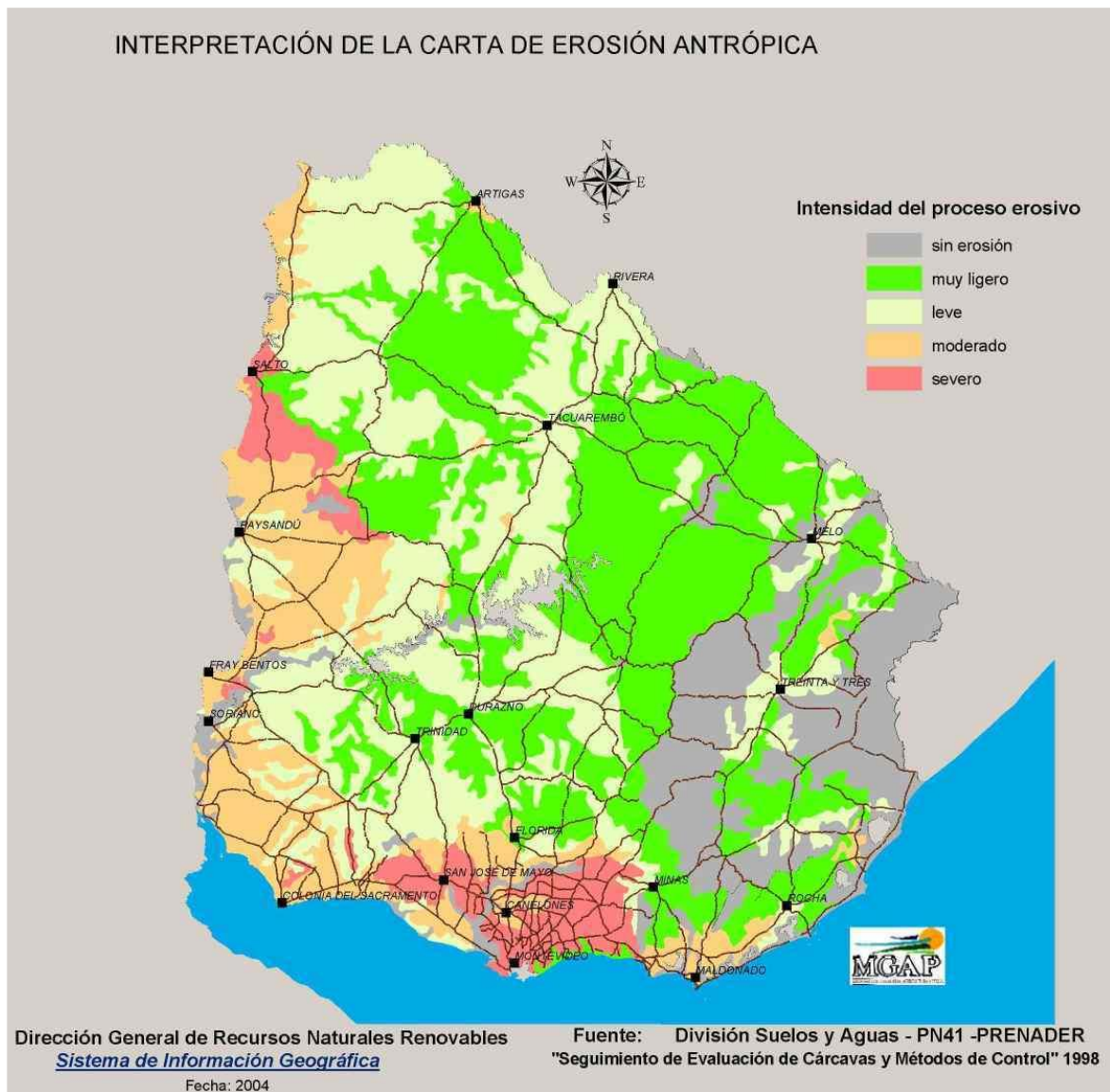


Figura 3.3.17. Cartas de erosión de suelos de Uruguay (tomado de edafología.fcien.edu.uy)

Un mayor detalle de tales prácticas a lo largo de 11 años de control por parte de la Dirección General de Recursos Naturales del MGAP se presenta en la

Tabla 3.5 (Sánchez y Cléricsi, 2020).

Tabla 3.5. Principales prácticas inadecuadas constatadas en el período 2008-2019, en porcentaje (promedio) (Tomada de Sánchez y Cléricsi, 2020)

| Prácticas inadecuadas | Promedio (%) |
|---|--------------|
| Aplicación de herbicidas desagües naturales | 26 |
| Laboreo desagües y concavidades | 19 |
| Suelo desnudo | 12 |
| Laboreo en declive | 10 |
| Pasaje maquinaria a favor pendiente. Huellado | 9 |
| Falta de nivelación | 6 |
| Mal dimensionamiento de desagües | 6 |
| Laboreo cárcavas sin objetivo de recuperación | 4 |
| Inadecuado diseño y construcción de caminería interna | 4 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| Laboreo cabeceras y remates | 3 |
| TOTAL | 100 |

Nuestro país ha suscripto el Protocolo contra la Desertificación y la Sequía ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) en 1999, según el cual se obliga a presentar informes nacionales anuales. Participa también de la Estrategia MERCOSUR de Lucha contra la Desertificación, la Degradación de la Tierra y los Efectos de la Sequía, que fue elaborada en 2007 por los cinco países miembros del MERCOSUR más Chile y Bolivia actuando como estados asociados en esta estrategia regional. La comunicación inicial elaborada en el año 2000 para presentar a la Conferencia de las Partes advierte sobre la *elevada vulnerabilidad* de nuestro país a la *desertificación*, agravada por la fuerte dependencia que de ellos tiene la economía nacional.

En 2014, la RENARE-MGAP actualizó las exigencias en cuanto a la presentación de Planes de Uso y Manejo de Suelos, en los que se debe definir la sucesión de cultivos a realizar en una unidad de producción, de modo que no se generen pérdidas de suelo por erosión por encima de la tolerancia de ese suelo. Estos Planes deben ser elaborados y presentados por un Ingeniero Agrónomo registrado ante el MGAP.

3.4 Flujo de energía en los ecosistemas

La energía motora que permite el funcionamiento y la supervivencia de un ecosistema es la energía que ingresa a él, que en última instancia es energía solar. El primer principio de la termodinámica, válido en cualquier sistema, se puede expresar diciendo que el flujo neto de energía que ingresa a un ecosistema (energía entrante menos energía saliente) es igual a la tasa de acumulación de energía en él. El segundo principio se puede formular como: la conversión de energía solar en energía potencial acumulada en la materia orgánica tiene un rendimiento menor que 1, es decir, en la transformación se libera calor. Las pérdidas de energía en forma de calor que ocurren en un ecosistema son muy grandes, ya que son sistemas energéticamente muy ineficientes. Por lo general, la porción realmente aprovechada de un nivel energético al siguiente no supera el 20 % de la energía teóricamente disponible.

3.4.1 Modelo general de flujo de la energía propuesto por Odum

El modelo general de flujo de la energía que propone Odum muestra esquemáticamente los posibles destinos de la energía entrante a un ecosistema (ver Figura 3.4.1).

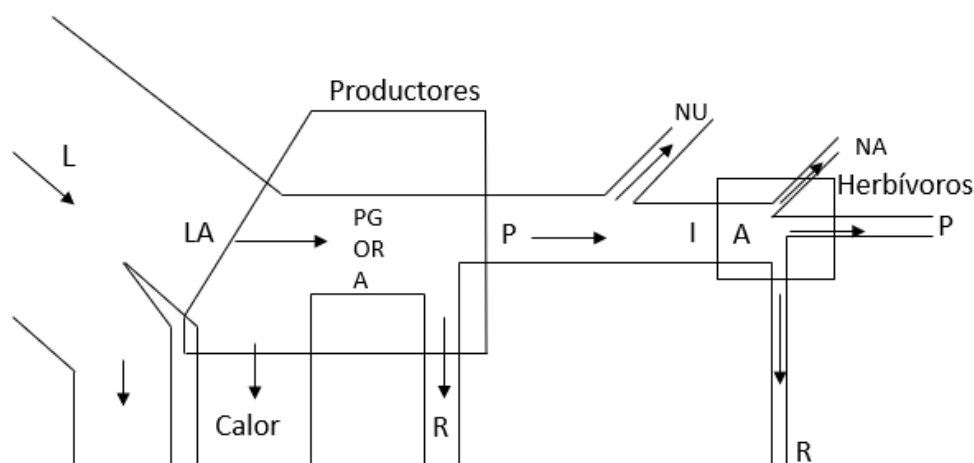


Figura 3.4.1. Diagrama simplificado de flujos de energía a través de los primeros niveles tróficos (adaptado de Odum)

- De la energía solar que llega al sistema, sólo una pequeña fracción es efectivamente recibida por los organismos productores.
- Los organismos productores sólo usan una porción de la energía que efectivamente reciben.
- De la energía efectivamente aprovechada por los productores, una parte se gasta en la respiración (R) y el resto, es la energía disponible para sostener un nuevo nivel trófico que se alimente de los productores.
- De la energía que pasa del primer al segundo nivel trófico, hay una parte que no es aprovechada y se pierde (energía no utilizada, NU).
- De la energía efectivamente aprovechada por los organismos del segundo nivel trófico, una parte se gasta en la respiración y otra es aprovechada pero no asimilada (NA), por lo que se pierde con las excretas. El remanente es la energía que se gasta efectivamente en el crecimiento de biomasa en ese nivel trófico, y constituye la energía disponible para sostener un nuevo nivel trófico que se alimente de éste. Al primer nivel por encima de los organismos productores se lo designa como “consumidores primarios” o herbívoros, porque se alimentan de vegetales; al próximo nivel se lo designa como “consumidores secundarios” o “carnívoros primarios”.

El esquema de uso de energía de los consumidores secundarios es idéntico al de los consumidores primarios, pero las cantidades de energía que siguen cada posible destino son mucho menores que en el nivel anterior, puesto que ya la energía entrante en este nivel es mucho menor que en el anterior – es la energía que dejó efectivamente disponible el nivel de los consumidores primarios para sostener el siguiente nivel trófico-. Por lo tanto, la *cantidad de niveles tróficos* que puede albergar un ecosistema es *función de la energía neta disponible* para pasar de un nivel a otro.

3.4.2 Productividad

Se designa como **productividad** de un sistema ecológico, comunidad o cualquiera de sus partes a la *velocidad* con que la energía entrante se transforma en sustancias orgánicas.

El concepto de productividad necesariamente está ligado a un intervalo de tiempo: no se corresponde con una foto del sistema de estudio en un cierto momento, sino con el análisis de lo que ha sucedido en el sistema en el intervalo comprendido entre dos instantes. En efecto, los valores de productividad no son estáticos, se refieren más bien a *fertilidad* que a *cantidad de biomasa*, concepto éste que sí admite ser evaluado en un instante dado. Se pueden definir a su vez los siguientes conceptos, siempre referidos a un cierto período de tiempo:

- **Productividad primaria**: se refiere a la tasa con que la energía radiante se transforma en sustancias orgánicas por acción fotosintética (o quimiosintética) de organismos productores.
- **Productividad primaria bruta** (PPB, también llamada asimilación total o fotosíntesis total): es la totalidad de la materia orgánica sintetizada en un cierto período de tiempo, independientemente de su destino.

- **Productividad primaria neta** (PPN, también se llama asimilación neta o fotosíntesis aparente): es la tasa de almacenamiento de materia orgánica en los tejidos vegetales como resultado de un exceso de producción con respecto al consumo respiratorio (Figura 3.4.2).

La suma de la productividad primaria neta (PPN) y el consumo respiratorio (R) es el total de la productividad primaria bruta (PPB) en el período considerado: $PPB = PPN + R$

También se habla de **productividad neta de la comunidad** (PNC), aunque es un concepto levemente diferente de los anteriores: se refiere a la tasa de almacenamiento de la materia orgánica no utilizada por los heterótrofos, es decir, productividad primaria neta menos el consumo heterótrofo. Da idea del *crecimiento* del sistema en cuanto a *biomasa acumulada*.

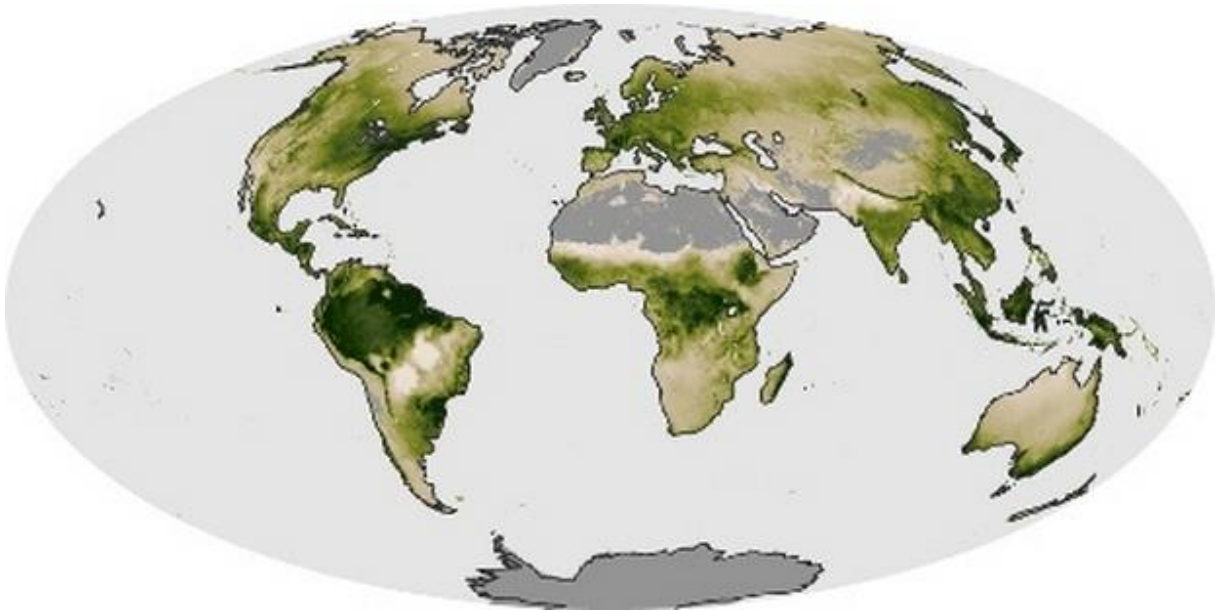


Figura 3.4.2. Distribución de la productividad primaria neta anual (Tomado de <http://www.mapa-del-mundo.es/mapa/mapa-del-mundo-productividad-primaria-neta/>)

3.4.3 Representación a través de pirámides

Las cadenas tróficas suelen representarse en forma de pirámides. Se pueden construir distintos tipos de pirámides: pirámides de **números**, de **biomasa** o de **energía**. Por lo general los valores en cada nivel se expresan respectivamente en individuos/m², kg/m² y kcal/m²/año. Las dos primeras pueden invertirse, por lo que no se consideran adecuadas para representar las cadenas tróficas.

Una **pirámide de energía** se construye asociando a cada nivel trófico un flujo de energía en cierto período de tiempo, que puede ser la *energía aprovechada bruta* o *neta en un cierto período de tiempo* (productividad bruta o neta). Al estar trabajando con los flujos de energía de un nivel trófico a otro, esta representación *no puede invertirse*, porque la magnitud de dichos flujos se va reduciendo a medida que se pasa de un nivel a otro debido a las importantes pérdidas que ocurren en cada transferencia (recordar que se tiene energía no utilizada entre un nivel y el siguiente y energía no asimilada en cada nivel). Éste es el modo más correcto de construir la pirámide, no sólo porque se tiene una visión en un período de tiempo y no en un instante puntual escogido al azar, sino porque se logra, para cada nivel trófico, una idea de su capacidad de sustentar otro nuevo nivel.

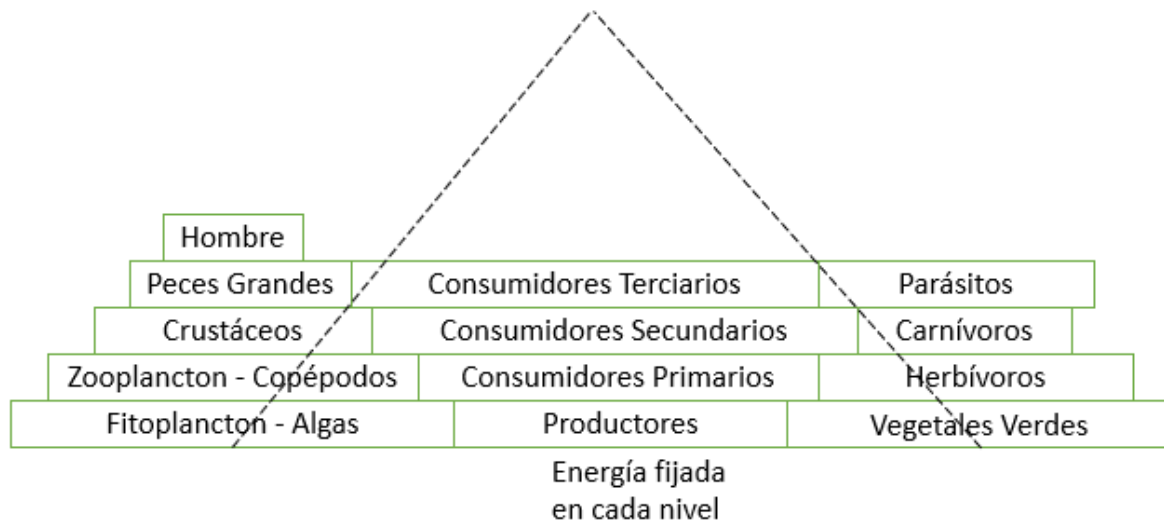


Figura 3.4.3. Pirámides de biomasa (lateral izq.), números (lateral der.) y energía (punteada al centro) para un mismo sistema (elaboración propia)

3.4.4 Cadenas tróficas y tramas tróficas

Una **cadena trófica** consiste en la transferencia de energía en forma de alimento desde su fuente en los organismos autótrofos y a través de una serie de organismos que consumen y son consumidos.

Se puede hablar de **cadena de apacentamiento** y **cadena de detritos**, pero el funcionamiento de la cadena como tal en ambos casos es semejante. A su vez, las cadenas de apacentamiento pueden ser cadenas de depredadores o de parásitos.

De acuerdo con su **función o nicho trófico** en la cadena trófica, se reconocen tres grandes grupos de seres vivos: organismos productores, consumidores y descomponedores, pero estos últimos son, en definitiva, un grupo particular de consumidores.

- **Organismos productores:** son los que sintetizan materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas. Los organismos productores son, por ejemplo, las plantas en el caso de ecosistemas terrestres, o las macroalgas y el fitoplancton (microalgas) en el caso de ecosistemas acuáticos.
- **Organismos consumidores:** son organismos que se alimentan de otros organismos o de materia orgánica. Aprovechan de esta manera la síntesis realizada por otros organismos. Los consumidores son los animales en general y el zooplancton. Los consumidores primarios son aquellos que se alimentan de organismos productores; los consumidores secundarios en cambio se alimentan de otros organismos consumidores. Estrictamente los organismos *consumidores* incluyen también a los *descomponedores* o *detritívoros*.

En efecto, se pueden reconocer dos grandes categorías de consumidores:

- **Macroconsumidores:** son organismos heterótrofos que ingieren materia orgánica en partículas. También se designan como *fagótrofos*. Tienden a estar adaptados a la búsqueda activa o la acumulación de alimentos, y por lo general son de tamaño importante. Son los que se identifican normalmente como “animales”.
- **Microconsumidores:** son microorganismos heterótrofos que se alimentan de materia orgánica disuelta, eventualmente de materia orgánica particulada. Participan en los ciclos de

descomposición de la materia orgánica proveniente de organismos muertos o de excretas de organismos vivos. En su mayoría los degradadores son organismos microscópicos relativamente inmóviles, de gran especialización (bacterias, hongos, etc.). Otras designaciones habituales para los microconsumidores son: organismos *saprótrofos*, *osmótrofos*, *detritívoros*, *saprófagos*, *desintegradores*, etc.

En la Figura 3.4.4 se presenta el esquema del modelo general de flujo de la energía según Odum, esta vez mostrando explícitamente el lugar de los organismos descomponedores. En la Figura 3.4.6 se da una aproximación cuantitativa a los valores de flujos anules de energía en cada caso.

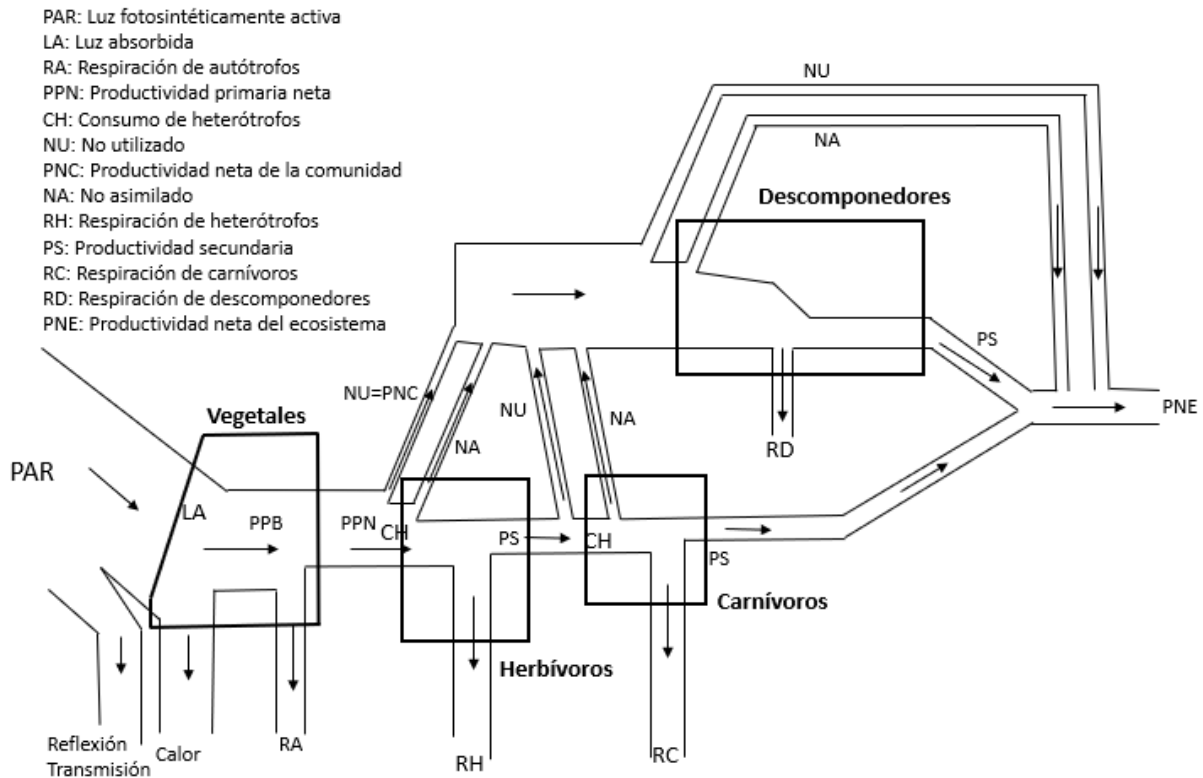


Figura 3.4.4. Diagrama de flujos de energía incorporando los organismos descomponedores (adaptado de Odum).

De acuerdo con la función que cumple cada organismo en la cadena trófica, se reconocen en ella distintos **niveles tróficos**:

- Primer nivel: **organismos productores** (por ejemplo, las plantas verdes)
- Segundo nivel: **consumidores primarios** (organismos herbívoros, que se alimentan de los productores)
- Tercer nivel: **consumidores secundarios** (organismos carnívoros primarios, que se alimentan de los herbívoros)
- Cuarto nivel: **consumidores terciarios** (organismos carnívoros secundarios, que se alimentan de los carnívoros primarios)

En cada transferencia existe una importante pérdida energética, que puede ser más del 80 %. Por ello, difícilmente se pueda tener mucho más de cuatro niveles en una cadena trófica.

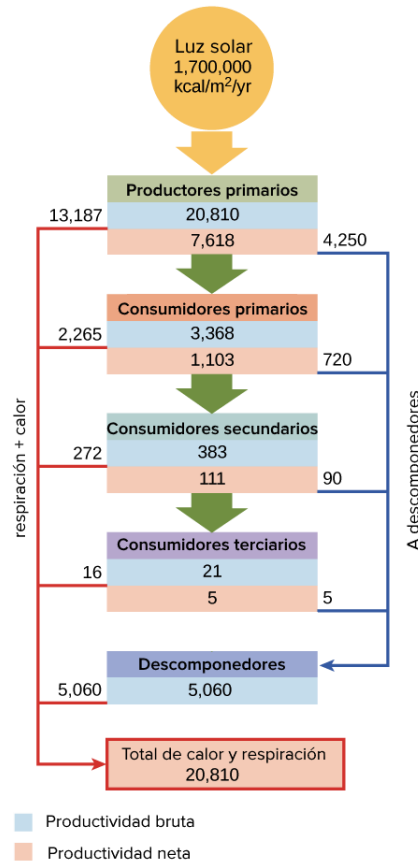


Figura 3.4.5. Valores anuales de productividad bruta y neta a lo largo de un ecosistema (tomado de <https://es.khanacademy.org/science/biology/ecology/intro-to-ecosystems/a/energy-flow-primary-productivity/>)

Por lo general distintas especies comparten un mismo **nicho trófico** (un mismo rol en la cadena), y entonces en vez de una cadena trófica se tiene una **red** o **trama trófica** (ver Figura 3.4.6). Cuanto más densa es la trama trófica, más equilibrado resultará el sistema.

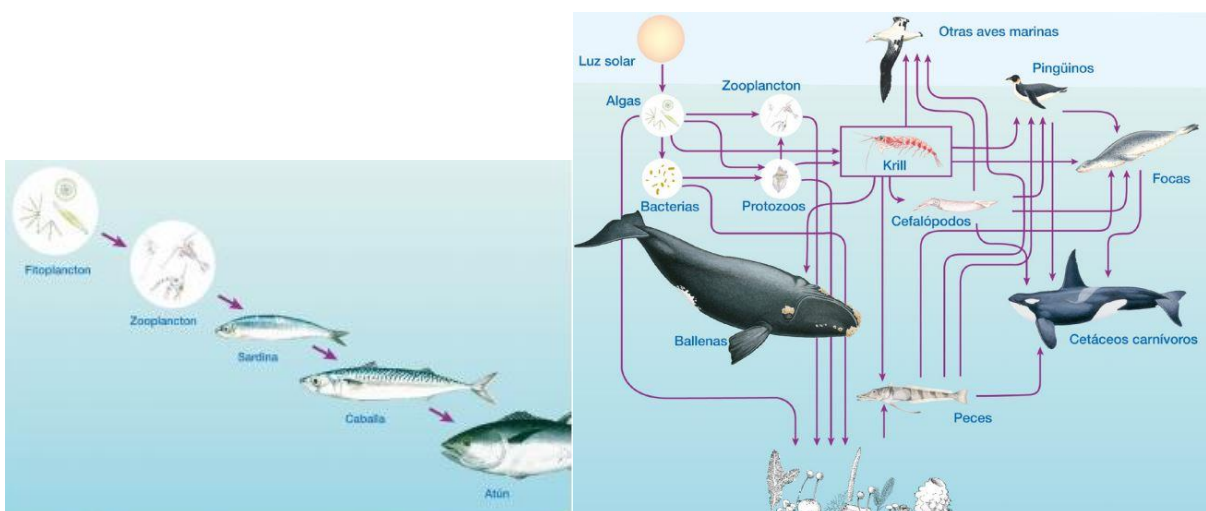


Figura 3.4.6. Cadena trófica (izq.), trama trófica (der.) (tomadas de <https://ecosistemas.ovacen.com/cadena-alimenticia-red-trofica/>)

3.5 Ciclos biogeoquímicos

Los elementos y compuestos químicos están en permanente circulación en la biósfera, a través de un pasaje dinámico por fases bióticas y abióticas. Esa circulación a través de los seres vivos y el ambiente se da, en cada caso, según vías y procesos característicos, y es lo que se designa como **ciclo biogeoquímico** de un elemento o compuesto. Los ciclos biogeoquímicos, entonces, describen cómo circulan en la biósfera los principales elementos y compuestos químicos esenciales para la vida.

En cada ciclo biogeoquímico se pueden reconocer dos grandes compartimentos (ver Figura 3.5.1):

- El **reservorio**, que es el gran depósito en el cual se da el mayor almacenamiento, generalmente abiótico y de movimiento lento.
- La **poza lábil o circulante**, que es una porción más pequeña pero más dinámica, que incluye a los organismos y su ambiente inmediato. Es la parte que está en permanente intercambio.

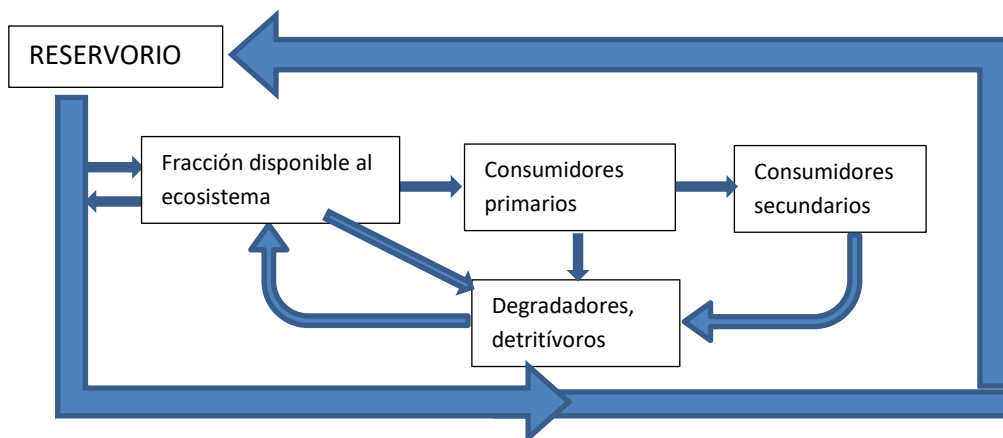


Figura 3.5.1. Esquema general de un ciclo biogeoquímico (basado en Odum)

De acuerdo con el reservorio, los ciclos pueden clasificarse en **gaseosos** o **sedimentarios**.

- En los **ciclos gaseosos** el reservorio está en la *atmósfera* o la *hidrósfera*. Los ciclos gaseosos, por lo general, se adaptan mejor a los cambios. Su poza circulante es más compleja y son ciclos bien amortiguados.
- Los **ciclos sedimentarios** tienen su reservorio en la *corteza terrestre*. Su poza circulante suele ser más simple. Están menos regulados y son susceptibles de alterarse y desequilibrarse más fácilmente (son ciclos más abiertos); estos desequilibrios suelen estar relacionados también con las intervenciones del hombre.

Entre los ciclos biogeoquímicos de mayor interés ambiental cabe citar los ciclos del agua (o ciclo hidrológico), del carbono, del nitrógeno y del fósforo.

3.5.1 Ciclo hidrológico

Siendo el agua un compuesto de esencial importancia para la vida, el ciclo hidrológico merece ser presentado en estas nociones básicas de ecología, más allá de que desde el punto de vista ingenieril será objeto de estudio profundo en otros cursos.

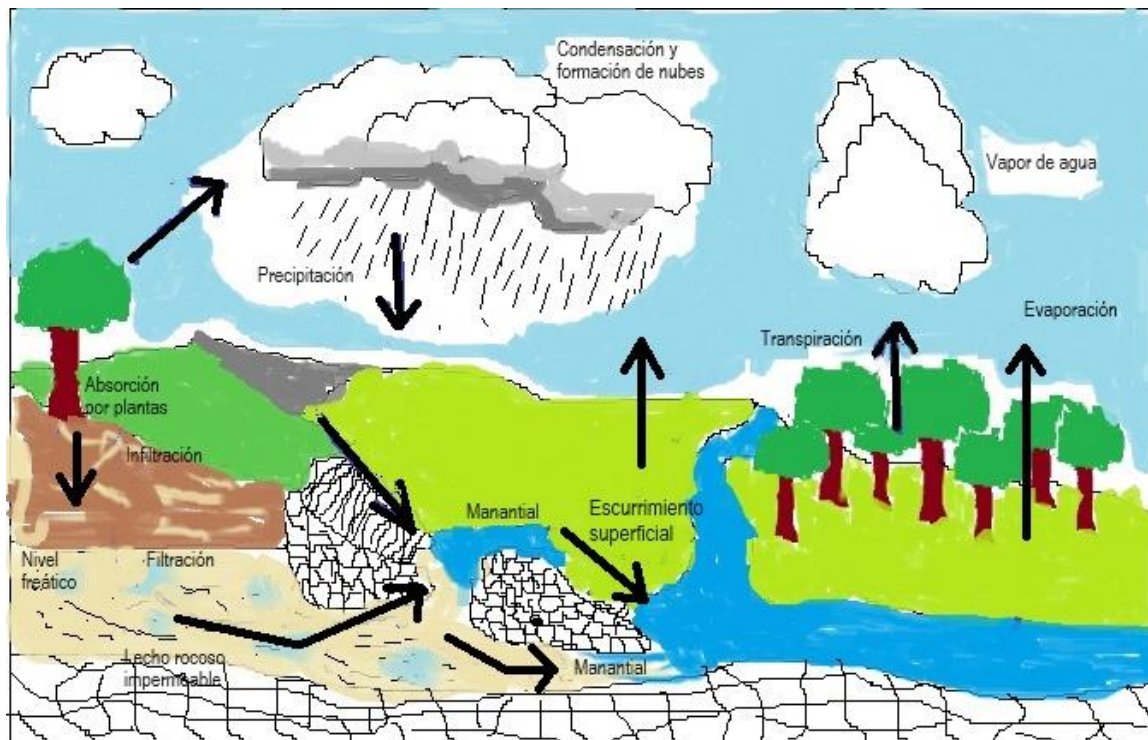


Figura 3.5.2. Esquema del ciclo hidrológico (Elaboración propia)

El ciclo hidrológico es de circulación muy ágil. El gran reservorio de agua salada está en los océanos, en tanto el de agua dulce está en las aguas subterráneas –principalmente en las napas profundas-. A escala global, se considera como un ciclo equilibrado, más allá de que las intervenciones antrópicas están generando modificaciones tanto a nivel global como local. Como ejemplo de modificaciones a nivel global se puede mencionar el incremento de la temperatura media terrestre –como consecuencia del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero-, que conduce al incremento de la cantidad de vapor de agua de saturación que acepta la atmósfera; el vapor de agua es un importante gas de efecto invernadero. Una de las consecuencias a nivel local es la modificación de los regímenes climáticos, con énfasis en los aspectos pluviométricos. Entre las alteraciones inducidas por el hombre se cuentan, por ejemplo, la sobreextracción de aguas tanto superficiales como subterráneas (sin respetar los tiempos de renovación) o la modificación de los coeficientes de escorrentía superficial.

A lo largo de su ciclo, el agua pasa de la Tierra a la atmósfera y regresa a ella. El agua es evaporada desde las superficies expuestas a la atmósfera (océanos, mares, lagos, etc.) por acción de la radiación solar, incrementando la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. El agua se mantiene en fase gaseosa en la atmósfera hasta alcanzar la concentración de saturación (que depende de la temperatura) y hasta que comience a ocurrir un proceso de **condensación** sobre alguna superficie, que por lo general es provista por partículas microscópicas presentes en la atmósfera y que se designan como “núcleos de condensación”. En estas condiciones, ocurre la formación de nubes, que se mantienen como tales hasta que se dan las condiciones para que el agua vuelva a la Tierra como **precipitación**. Si bien las precipitaciones ocurren mayoritariamente en estado líquido, pueden también ser sólidas, como granizo o nieve.

Cuando la precipitación cae sobre la Tierra, puede tener distintos destinos: una parte puede caer sobre la vegetación (las hojas) y no alcanzar efectivamente el suelo; es el **flujo de interceptación**. El agua interceptada por la vegetación podrá luego evaporar o seguir su tránsito hacia el suelo.

La parte de la precipitación que efectivamente llega a la tierra puede escurrir superficialmente o penetrar en el suelo. La **escorrentía superficial** puede ir a un cuerpo de agua lótico o léntico⁹, o al mar. Al llegar a un cuerpo léntico o al mar, se produce **evaporación** desde la superficie expuesta y el agua regresa a la atmósfera para recomenzar el ciclo.

La **infiltración** se divide en *percolación* o *infiltración subsuperficial*, e *infiltración profunda*. Parte del agua que infiltra subsuperficialmente es captada por los vegetales para sus funciones vitales; de ella, una parte va a la constitución de los tejidos y otra parte se pierde y retorna nuevamente a la atmósfera como **evapotranspiración**. La infiltración profunda, por su parte, permite la *recarga de las aguas subterráneas*.

Dado que la renovación de las reservas de agua subterránea es muy lenta, a la escala de tiempo humana suelen considerarse como *recursos no renovables*, por lo que su preservación libre de contaminación constituye un aspecto crítico. El agua dulce renovable a escala de tiempo humana es la de los cuerpos de agua superficiales. Esto genera un llamado de atención sobre la importancia de atender e intentar mitigar los problemas de contaminación de cuerpos de agua dulce, dado que es de la que la humanidad depende para su supervivencia.

3.5.2 Ciclo del nitrógeno

Es uno de los ciclos cuya poza circulante es más compleja. El reservorio está en la atmósfera (aproximadamente el 78 % de la atmósfera es nitrógeno molecular) y, como la mayoría de los ciclos gaseosos, es un ciclo equilibrado.

El nitrógeno es uno de los componentes principales del protoplasma; fundamentalmente se encuentra en aminoácidos y proteínas. Cuando los seres vivos mueren, sus tejidos son descompuestos por un conjunto de organismos especializados. Inicialmente el nitrógeno de los tejidos vivos pasa a amoníaco y a ion amonio por acción de las *bacterias amonificadoras*, a través de un proceso conocido como **amonificación**. Este destino es también el del nitrógeno contenido en las excretas de los seres vivos.

A partir de allí, comienza el ciclo de **nitrificación**, que ocurre en dos etapas: inicialmente las *nitrosomonas* llevan el amonio a **nitritos**, y luego las *nitrobacter* realizan el pasaje de nitritos a **nitratos**. Los nitratos son la forma del nitrógeno efectivamente aprovechable por los vegetales. El pasaje de nitritos a nitratos es muy rápido, por lo que la presencia de nitritos en agua indica que existe una contaminación orgánica reciente, puesto que no ha habido tiempo suficiente para que sean convertidos en nitratos. Los nitratos son agentes cuya ingesta puede ocasionar trastornos a la salud. El caso más conocido es el de la *enfermedad de los niños azules* (metahemoglobinemia), que se produce por ingesta de agua rica en nitratos y que en determinadas condiciones puede producir aun la muerte en niños de corta edad.

Existen unos pocos organismos que tienen la capacidad de fijar y aprovechar directamente el nitrógeno atmosférico. Entre los organismos **fijadores de nitrógeno** se pueden citar distintos tipos de bacterias: bacterias aerobias, por ejemplo *Azotobacter*, y bacterias anaerobias, como por ejemplo, *Clostridium*; las bacterias de los nódulos simbióticos de las leguminosas (*Rhizobium*), que toman el nitrógeno

⁹ Entre las aguas continentales, se designan como cuerpos de agua **lóticos** aquellos en los que se puede definir una dirección preferencial de flujo (ríos, arroyos, cañadas); y como cuerpos de agua **lénticos** aquellos en los que esto no es posible (lagos, lagunas, embalses).

presente en el aire que está en los poros del suelo y actúan como un sistema de fertilización muy específico para los vegetales con los que viven en simbiosis; los actinomicetos, que son hongos primitivos que tienen un desempeño similar a las bacterias antes mencionadas pero que forman nódulos en plantas leñosas –en vez de leguminosas-, entre ellas la araucaria y la casuarina; y las cianofitas, cianofíceas, cianobacterias o algas azules (*Anabaena*, *Oscillatoria* y otras), que tienen un rol muy importante en episodios de contaminación de tipo eutrófico en aguas superficiales.

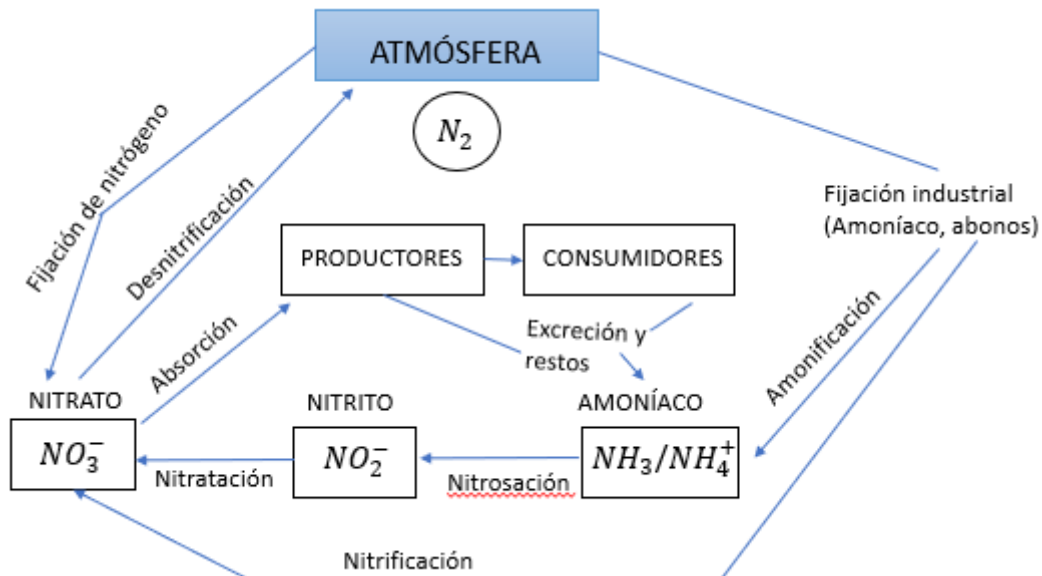


Figura 3.5.3. Ciclo del Nitrógeno (elaboración propia)

En el ciclo del nitrógeno participan otros microorganismos especializados, entre ellos las *Pseudomonas*, capaces de llevar los nitratos a **nitrógeno molecular** que se emite a la atmósfera en un proceso que se denomina **denitrificación**.

En ingeniería sanitaria y ambiental es necesario actuar sobre los procesos de degradación de materia orgánica y realizar diseños que permitan obtener productos adecuados a la finalidad perseguida. En ese sentido, el conocimiento del funcionamiento de este ciclo y de las características de los organismos que realizan cada uno de los pasos (cuáles son aerobios y cuáles anaerobios, por ejemplo) es muy importante a la hora de diseñar procesos de depuración de efluentes, especialmente si el vertido final puede llegar a un cuerpo de agua léntico.

Si bien así se han resumido los distintos procesos que ocurren en la porción biótica del ciclo del nitrógeno, existen otros, de menor incidencia cuantitativamente hablando, como pueden ser los aportes volcánicos o de tormentas eléctricas, las salidas del sistema por pérdidas hacia sedimentos profundos, lixiviación por uso de fertilizantes en exceso, etc.

3.5.3 Ciclo del fósforo

En el extremo opuesto al ciclo del nitrógeno, que es un ciclo gaseoso bien equilibrado, con una fase biótica muy activa y compleja, se presenta el ciclo del fósforo, un ciclo sedimentario bastante “abierto” o poco equilibrado, cuyo reservorio se encuentra en las rocas fosfatadas que integran la corteza terrestre.

La poza circulante tiene un andamio bastante simple. La forma del fósforo que emplean los vegetales para nutrirse son los **fosfatos** (PO_4^{3-}). De esta manera, el fósforo pasa a formar parte del protoplasma vegetal y animal, y es incorporado a los ácidos nucleicos, a los fosfolípidos, a las cadenas de ADP y ATP, etc. En animales superiores también forma parte de huesos y dientes, y está presente en sus excretas.

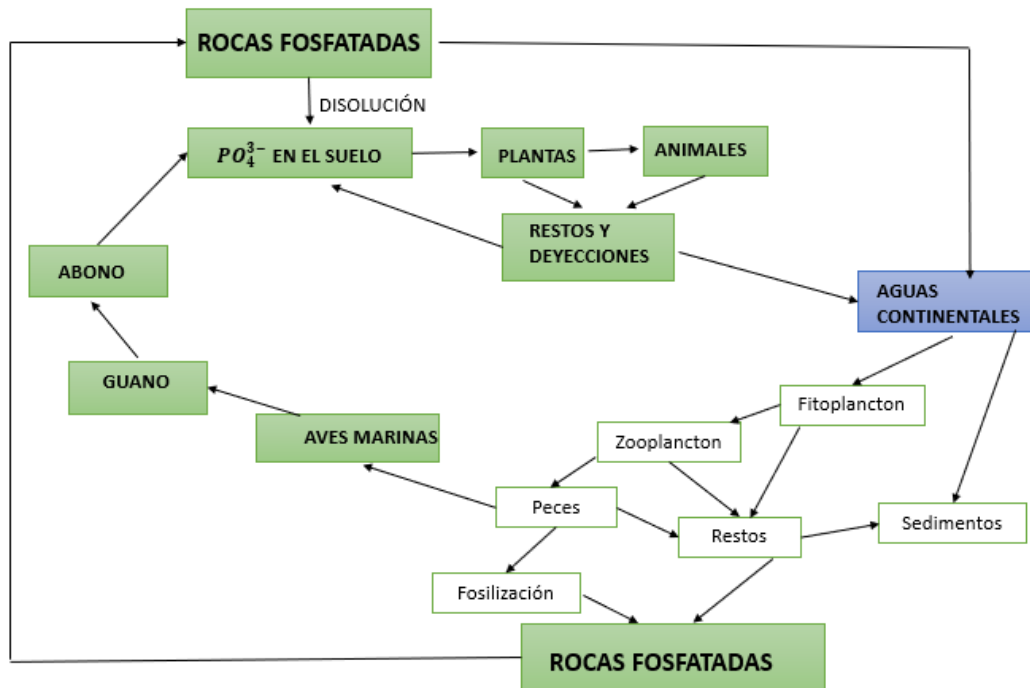


Figura 3.5.4. Ciclo del Fósforo (elaboración propia)

Cuando los seres vivos mueren, sus tejidos son degradados de manera de devolver el fósforo a la forma de fosfatos para reintegrarlo al ciclo. Pero una parte del fósforo, presente en huesos y dientes, no se degrada con facilidad y pasa a formar parte de yacimientos fósiles o de sedimentos profundos, por lo que sale del sistema. También el contenido de fósforo de las excretas muchas veces no vuelve al sistema, y se elimina, por ejemplo, con las aguas residuales. Una recuperación o aporte de fósforo a la poza lábil está dado por los excrementos de algunas aves, que permite reincorporarlo al sistema a través de fertilizantes naturales. Aquí merece ser mencionado el caso de las islas guaneras en Perú, que permitieron la explotación masiva de ese fertilizante natural acumulado durante muy largos períodos de tiempo, sin contemplar la tasa de renovación natural del mismo; las reservas se agotaron rápidamente.

En cuanto a las reservas de fósforo en la corteza terrestre, la industria de los fertilizantes producidos a partir de rocas fosfatadas genera una reducción sostenida en el reservorio. Muchas veces las prácticas asociadas al “más es mejor” hacen que buena parte de los fertilizantes químicos aplicados no cumplan su función y sean lixiviados de la zona de aplicación, arrastrados a cuerpos de agua y depositados en sedimentos. Estos sedimentos ricos en fósforo pueden salir del sistema -si no son resuspendidos-, o bien ser resuspendidos por la propia dinámica del cuerpo de agua y convertirse en agentes de contaminación eutrófica. Esto ocurre sobre todo cuando los sedimentos ricos en fósforo se depositan en cuerpos de agua *lénticos* (es decir, con poco recambio, como lagos y embalses).

3.5.4 Ciclo del carbono

El carbono, como elemento esencial de la materia orgánica, tiene un ciclo complejo en su conjunto, pero en el que las partes biológicamente más activas siguen un esquema relativamente sencillo.

Se pueden reconocer cuatro grandes reservorios de carbono: los **carbonatos** en los océanos; el **dióxido de carbono** en la atmósfera; el carbono que forma parte de **sedimentos y rocas**; y el carbono que forma parte de las **sustancias húmicas** en los suelos (Figura 3.5.5). El equilibrio del ciclo está vinculado principalmente a la relación entre fotosíntesis y respiración –o sea, entre fijación y emisión a nivel atmosférico–, más allá de que, cuantitativamente, no es la atmósfera el mayor de los cuatro reservorios mencionados sino los carbonatos en los océanos.

El dióxido de carbono es la forma de carbono que emplean los organismos fotosintéticos para sintetizar materia orgánica. En fase aerobia, la fotosíntesis es realizada por plantas verdes y algas. La materia orgánica sintetizada es consumida luego tanto por plantas como por animales y microorganismos aerobios en la respiración, emitiendo nuevamente dióxido de carbono. Esta fase aerobia es la que cuantitativamente tiene mayor incidencia en la poza circulante del ciclo del carbono.

Pero en el ciclo del carbono también participan microorganismos anaerobios, que fijan dióxido de carbono para sintetizar materia orgánica y luego lo emiten a través de sus reacciones catabólicas, tanto de respiración anaerobia como de fermentación. La materia orgánica puede, en fase anaerobia, pasar a metano ($\text{CH}_{4(g)}$) por acción de las bacterias metanogénicas. Éstas también pueden llevar el dióxido de carbono a metano. El metano puede pasar a dióxido de carbono por acción de las bacterias metilotróficas, que son capaces de realizar esta oxidación. La transformación de metano a dióxido de carbono puede ser realizada por acción de bacterias metanotróficas, que son organismos procariotas que realizan esta oxidación en condiciones aerobias.



Figura 3.5.5. Los cuatro reservorios del ciclo del Carbono: atmósfera, litósfera (suelo y subsuelo), océanos. [Adaptado de: Luna. M, 2016]

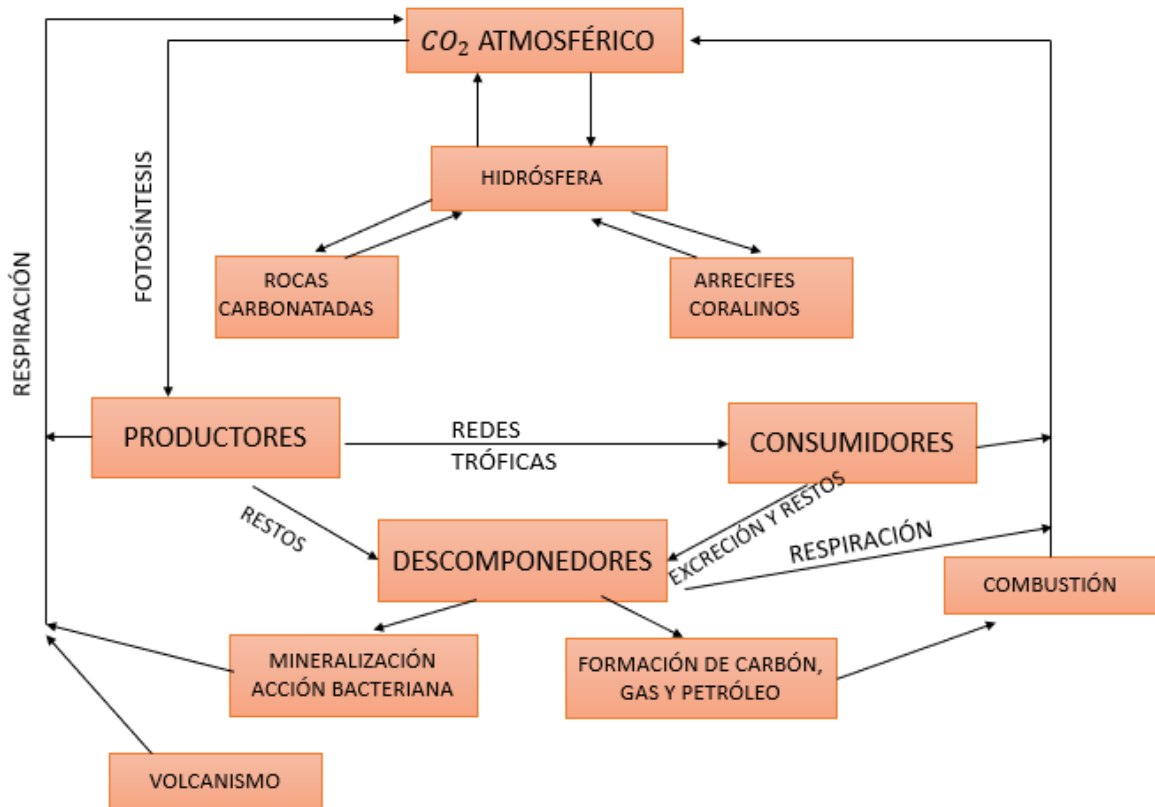


Figura 3.5.6. Ciclo del Carbono (Elaboración propia)

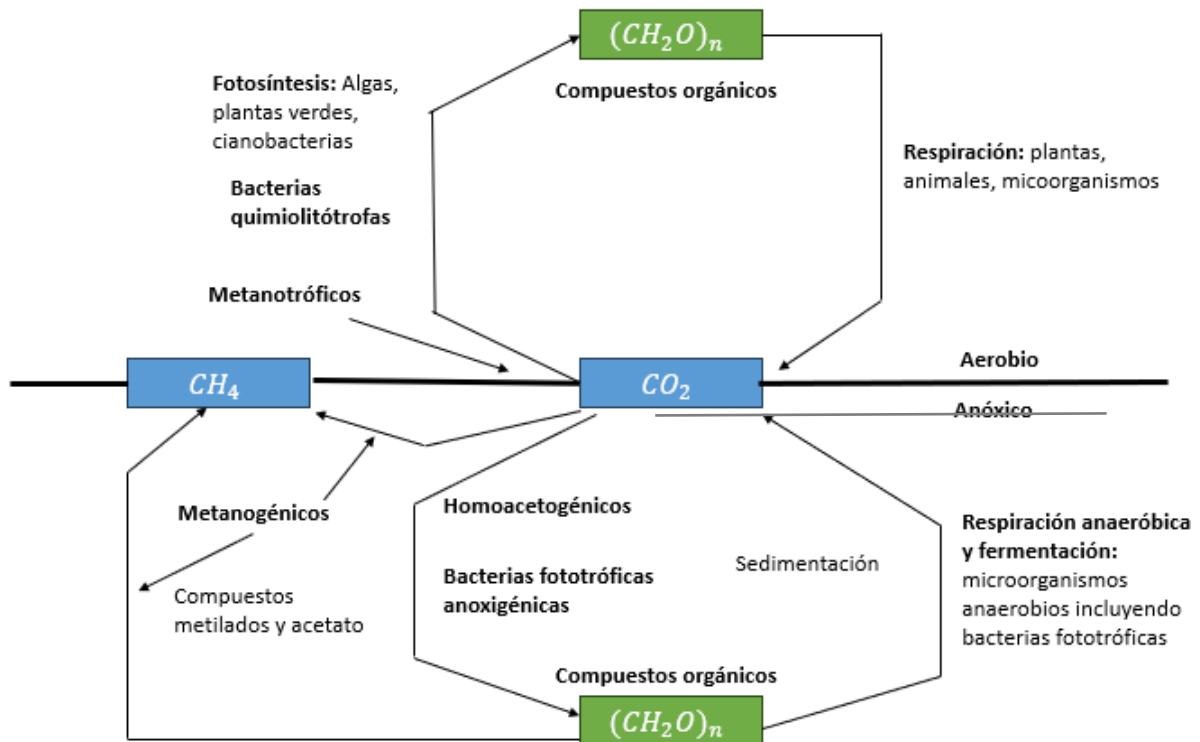


Figura 3.5.7. Fases aerobia y anaerobia en la síntesis de materia orgánica (elaboración propia)

4 Conceptos de Toxicología Ambiental

La **toxicología** es una disciplina científica cuyo objetivo es entender cómo afectan ciertas sustancias químicas al organismo de los seres vivos y encontrar los niveles de estas sustancias a partir de los cuales un compuesto pasa de ser seguro a no serlo.

La toxicología como disciplina nace con **Paracelso** (1493 – 1541), quien es el primero en formular la idea de que los efectos adversos de un agente están estrechamente relacionados con las condiciones de exposición: “*Dosis sola facit venenum*”, lo que implica que no sólo de la esencia del agente dependen tales efectos. Todas las sustancias son capaces de generar efectos nocivos. No hay sustancia alguna que no tenga efecto tóxico y la diferencia entre un veneno, un remedio o una sustancia inocua es la **dosis**. Si bien el campo de acción de la toxicología originalmente se refería a los efectos de los tóxicos sobre el hombre y su salud (lo que ahora se designa como *Toxicología Clínica*), existen otras ramas de esta disciplina como la *Toxicología Forense*, la *Toxicología Alimentaria*, la *Toxicología Laboral* u *Ocupacional*, la *Toxicología Ambiental* (que hace referencia a los tóxicos en su relación con el ambiente) o la *Ecotoxicología* (que se refiere, en un sentido amplio, a la incidencia de los tóxicos sobre los ecosistemas). El objeto de estudio de la toxicología ambiental es el impacto causado por los diferentes contaminantes en el ambiente, y en particular sobre los seres vivos. En esta sección se presentan algunos de los conceptos básicos de la toxicología ambiental.

4.1 Dosis

El concepto básico sobre el que se trabaja para determinar el potencial de un agente de causar efectos adversos sobre el organismo receptor es la **dosis**. Según la RAE (Ed. 23ª), se entiende por **dosis** a “una cierta cantidad de algo”. En esta sección, se designa como dosis a la cantidad de contaminante a la que está expuesto o la que alcanza a un organismo o punto receptor.

Cuando se habla de **dosis de una sustancia química**, se trata del flujo de una sustancia (un caudal másico, una tasa de aplicación, una cantidad de sustancia por unidad de tiempo) que alcanza a un organismo durante un cierto tiempo de exposición. Esa cantidad suele relacionarse con el peso corporal del organismo receptor; en ese caso, la dosis se puede expresar en *(mg/día)/kg de peso*.

En el caso de contaminantes ambientales, se designa como **dosis de exposición, dosis potencial o dosis externa** a la cantidad de la cantidad de una sustancia contenida en el material ingerido, en el aire inspirado o en el material aplicado a la piel, es decir, la cantidad de contaminante **presente en el entorno inmediato** del receptor. Este valor acota la cantidad de contaminante que podría alcanzar al organismo. Pero no toda la dosis de exposición es absorbida por el organismo; se entiende por **dosis absorbida** a la cantidad de una sustancia que atraviesa una barrera de absorción (límite de intercambio) de un organismo, ya sea por medio de mecanismos físicos o biológicos. A su vez, no toda la **dosis absorbida** tiene por qué alcanzar efectivamente el órgano blanco¹⁰, es decir, no toda actúa como **dosis efectiva**. En resumen:

$$\text{Dosis de exposición} \geq \text{Dosis absorbida} \geq \text{Dosis efectiva}$$

¹⁰ Se designa como “órgano blanco” a aquel en que se da el mayor efecto adverso o en el que se concentra la acción del tóxico en cuestión.

La mínima dosis que puede causar un efecto adverso se designa como *dosis tóxica*; la que puede causar la muerte de un cierto porcentaje de individuos de la población expuesta, se designa como *dosis letal*.

Cuando se tiene una *exposición breve* (en general en un lapso inferior a 24 horas) a una elevada intensidad o un flujo de alta concentración, en una única instancia en la que se alcanza la dosis suficiente para producir efectos adversos, se habla de ***exposición aguda***. Por el contrario, se habla de ***exposición crónica*** cuando ésta ocurre en varias instancias de exposición que suceden en un *tiempo prolongado* (usualmente de al menos 3 meses) a baja intensidad o baja tasa de aplicación.

Los efectos de un mismo agente ante distintas modalidades de exposición pueden ser diferentes. Un ejemplo es el efecto del benceno en el hombre, que por exposición aguda produce efecto anestésico, en tanto por exposición crónica puede resultar cancerígeno. Uno de los factores con mayor influencia en los posibles efectos tóxicos de un agente es la vía a través de la cual ingresa al organismo. Las vías de entrada de importancia ambiental a través de la que pueden ingresar agentes o químicos o microbiológicos al organismo se presentan en la próxima sección.

4.2 Vías de ingreso de contaminantes químicos y microbiológicos al organismo

4.2.1 Vía inhalatoria o respiratoria

Es la vía de acceso de mayor interés ambiental, puesto que la respiración es una función que no se puede suspender. En función del nivel de actividad, pasan por los pulmones de una persona entre 5 y 30 L/min de aire, y se encuentran con una superficie de intercambio del orden de los 90 m². La vía respiratoria es muy importante cuando existe contaminación atmosférica, debido a que, a través de ella, los tóxicos pueden ingresar fácilmente al organismo. Esto vale tanto para exposición ambiental como laboral.

4.2.2 Vía oral o digestiva

Cobra importancia cuando los agentes contaminantes están presentes en el agua o los alimentos. La intoxicación accidental vía oral puede ocurrir debido a la ingesta de agua o alimentos contaminados, o eventualmente a la ingesta accidental de un agente tóxico. Los niños son los que se intoxican a través de esta vía con mayor frecuencia, pero los casos de intoxicaciones masivas por ingesta de agua o alimentos contaminados son más que abundantes a lo largo de la historia.

4.2.3 Vía transplacentaria

Se da entre madre e hijo durante la gestación. Dependiendo del tóxico de que se trate, los efectos pueden incluso condicionar el normal desarrollo del feto. Esta vía es de gran importancia para contaminantes ambientales, especialmente cuando se trata de sustancias liposolubles.

4.2.4 Vía cutánea

Es menos frecuente a nivel de contaminantes ambientales químicos. Implica un contacto de la piel con el agente en cuestión. Al entrar la sustancia en contacto con la piel, puede ocurrir: que ésta actúe como barrera y no permita el ingreso de la sustancia al organismo; que ocurra sensibilización de esa zona de la piel; que la piel se irrite en contacto con el tóxico; o que el tóxico atraviese la barrera e ingrese al organismo.

4.3 Principales efectos tóxicos

4.3.1 Generalidades

Un **agente tóxico** es una *sustancia química* capaz de causar daño a un sistema biológico, alterando una función o llevando a la muerte, bajo ciertas condiciones de exposición (González Machín, S/A).

Los efectos que pueden tener los agentes tóxicos sobre la salud humana son muy variados, y dependen fuertemente de la naturaleza del contaminante en cuestión. Es oportuno mencionar que, atendiendo a la definición de *agente tóxico* propuesta en el párrafo anterior, esta sección **no considera** los efectos de los **contaminantes físicos**.

Se entiende por **efecto tóxico** a un **cambio biológico** producido en un organismo como resultado de la exposición a un cierto agente. Esto incluye efectos letales y no letales, como daños anatómicos o funcionales; desequilibrios fisiológicos; aumento en la sensibilidad a otros agentes perjudiciales; cambios comportamentales (los que generan, por ejemplo, las sustancias ergóticas), etc. Los efectos tóxicos suelen ser proporcionales a la dosis.

Los efectos tóxicos pueden manifestarse en forma *inmediata* o *diferida* (retardada). Los efectos inmediatos suelen manifestarse por ejemplo en el caso de exposiciones agudas; un conocido ejemplo de efectos que se suelen manifestar en forma diferida es el cáncer.

A su vez, los efectos tóxicos pueden ser *reversibles* o *irreversibles*, dependiendo del contaminante, de la dosis, de las condiciones de exposición, y de lo que ocurra en el período de post-exposición (atención o no, administración de otros agentes para atenuar efectos, eliminación parcial o total del tóxico, etc.).

Los efectos de un tóxico pueden estar asociados con la vía de entrada al organismo (por ejemplo, los contaminantes atmosféricos que actúan sobre el sistema respiratorio), caso en el que se habla de *efectos locales*; o pueden darse en órganos que no son los que han permitido el acceso del contaminante al organismo, caso en el que se habla de *tóxicos sistémicos* (por ejemplo, inhalación de un agente que produce un efecto anestésico, como el benceno).

En lo que sigue se lista un conjunto de efectos tóxicos subletales frecuentes, que puede emplearse también como una forma de clasificar agentes tóxicos según sus efectos. Debe tenerse en cuenta que un mismo contaminante puede provocar más de un tipo de efecto adverso, y que a su vez la dosis y la modalidad de exposición (aguda o crónica) condicionan el efecto que habrá de producirse.

4.3.2 Irritantes

Los agentes irritantes atacan el tejido con el que entran en contacto (piel, vías respiratorias, ojos, mucosas), produciendo una **inflamación** del mismo que se suele caracterizar por enrojecimiento, hinchazón y dolor. También pueden producir reacciones como comezón, ardor o tos. Por lo general se trata de respuestas agudas que ocurren a partir de ciertas concentraciones de contaminante, aun para tiempos de exposición muy breves. A concentraciones elevadas pueden producir lesiones en los tejidos, tanto reversibles como permanentes.

Los agentes irritantes pueden actuar sobre la piel (*irritantes cutáneos*) o sobre el aparato respiratorio (*irritantes respiratorios*). Los primeros tienen menor interés desde el punto de vista ambiental y son más estudiados desde la perspectiva ocupacional, pero los irritantes respiratorios son de gran

importancia ambiental. Los irritantes respiratorios actúan sobre distintas zonas del tracto respiratorio en función de sus características químicas. Los agentes **más hidrosolubles**, como ácidos y bases fuertes, actúan sobre el tracto respiratorio superior. Los **menos hidrosolubles** acceden a vías respiratorias profundas y actúan sobre los bronquios y tejido pulmonar (por ejemplo, el NO₂). Algunas sustancias actúan tanto sobre las vías respiratorias superiores como profundas; es el caso de muchos de los contaminantes atmosféricos gaseosos (por ejemplo, el O₃).

4.3.3 Neumoconióticos

Los agentes neumoconióticos causan efectos que se suelen llamar “*de pulmón sucio*”. Son contaminantes que se presentan en forma de partículas (polvos o fibras), que acceden a los pulmones y se acumulan en ellos. En forma genérica, estos efectos se designan como *fibrosis pulmonar* (una reacción del tejido pulmonar que lo torna inefectivo para la respiración). Algunas de esas fibrosis pueden ser de carácter cancerígeno. Entre las sustancias fibróticas más habituales cabe mencionar la sílice, el hierro y los asbestos.

Existe un grupo de partículas que se designa como *polvo molesto, partículas insolubles no clasificadas en otra parte, partículas no clasificadas de otro modo, partículas no reguladas de otro modo (nuisance dust o particulates not otherwise classified PNOC)*. Se trata de partículas que contienen menos de 1 % tanto de asbestos como de cuarzo, como por ejemplo, el polvo doméstico, para las que hasta el momento actual no se ha detectado otro tipo de efecto más allá de su acumulación a nivel pulmonar.

4.3.4 Sistémicos

Se designan como tóxicos sistémicos aquellos cuyo efecto no es da en la vía de entrada: se difunden por el organismo hasta alcanzar su punto o puntos de acción, o sea, sus “*órganos blanco*”.

Su designación proviene de esta característica de atacar alguno de los sistemas del organismo. Así, puede hablarse de sustancias *hepatotóxicas* (como el cloruro de vinilo), *nefrotóxicas* (como los PCB o el mercurio), *neurotóxicas* (como el DDT o el mercurio), etc.

Entre los tóxicos sistémicos de mayor relevancia ambiental corresponde mencionar los metales pesados (como por ejemplo el plomo) y algunos tipos de biocidas.

4.3.5 Anestésicos y narcóticos

Son un subgrupo de los tóxicos sistémicos, que actúan deprimiendo el sistema nervioso central. Como ejemplo cabe mencionar los hidrocarburos aromáticos (solventes), el éter etílico, algunas cetonas, alcoholes y ésteres.

4.3.6 Asfixiantes

Los gases asfixiantes pueden tener dos formas de actuación, según la cual se los diferencia en *asfixiantes simples* o *asfixiantes químicos*.

Los *asfixiantes simples* actúan por desplazamiento del oxígeno (disminuyen su porcentaje volumétrico en el aire), ocupando el lugar físico en el que debería haber oxígeno. Es el caso, por ejemplo, de los gases nobles, del dióxido de carbono y de los hidrocarburos de cadena lineal.

Los **asfixiantes químicos** tienen una forma de acción diferente, ya que luego de ingresar al organismo ocurre alguna reacción que acaba por producir asfixia a nivel celular, inhibiendo el transporte de oxígeno en el organismo. Es el caso del monóxido de carbono $\text{CO}_{(g)}$. Este gas es más afín que el oxígeno con la hemoglobina de la sangre. Entonces, en presencia de monóxido de carbono, tiene preferencia la formación de carboxihemoglobina frente a la formación de oxihemoglobina que habitualmente se forma cuando ingresa oxígeno al organismo. La carboxihemoglobina inhibe el transporte de oxígeno en el torrente sanguíneo, y en consecuencia produce asfixia por este mecanismo, que es diferente del que ocurre con los asfixiantes simples. Otros ejemplos de asfixiantes químicos son el cianuro CN^- y el nitrobenzeno $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$.

4.3.7 Alérgenos

De acuerdo con Zubeldía et al. (2012):

*“La alergia es una respuesta exagerada (reacción de hipersensibilidad) del sistema defensivo (sistema inmunitario) del paciente, que identifica como nocivas determinadas sustancias inocuas (como pueden ser los pólenes de algunas plantas o los ácaros del polvo doméstico, por ejemplo) habitualmente toleradas por la mayoría de las personas. Esta respuesta inapropiada y equivocada, en lugar de ser **beneficiosa**, es claramente **perjudicial** para el paciente y produce una serie de alteraciones inflamatorias de la piel y mucosas, que originan los diferentes síntomas y signos de las enfermedades alérgicas...”*

Los agentes alérgenos tienen la característica de producir efectos diferenciales en la población expuesta, dependiendo fuertemente de la susceptibilidad individual de los receptores. Son agentes que alteran los fenómenos de homeostasis o autorregulación del organismo, haciendo que éste se defiende de un agente que no debería representar un riesgo y que no genera reacción alguna en la mayoría de las personas. En general, las respuestas alérgicas suelen referirse a sucesos eruptivos, nerviosos o respiratorios. Los ejemplos más usuales a escala ambiental son los contaminantes atmosféricos de tipo biológico, como el polen, moho, hongos, esporas, vilanos (“pelusa” de los árboles en primavera), pelo y caspa de animales domésticos, ácaros, entre otros.

4.3.8 Cancerígenos

La carcinogénesis es un proceso que se caracteriza por la división y crecimiento descontrolado de las células, de tal modo que un tejido normal genera crecimiento de tejidos nuevos diferentes al original. Un contaminante cancerígeno o carcinogénico es aquel que tiene la propiedad de producir, inducir o incrementar la frecuencia con que ocurre esta forma de crecimiento desordenado de células en un tejido -cuyo producto se suele denominar “tumor” o “cáncer”-.

La carcinogénesis puede ocurrir por dos causas principales: por efecto de agentes externos (por ejemplo, ocupacionales, alimentarios, ambientales); o por predisposición genética (factores que se han transmitido en forma hereditaria).

Entre los agentes cancerígenos de importancia ambiental cabe mencionar a muchos metales (Cd, Cr, Hg, Ni, entre otros) y a algunos de sus compuestos; los disolventes aromáticos como el benceno o el hexano (el n-hexano es uno de los pocos alcanos tóxicos); la radiación ultravioleta; los gases de escape de motores diésel; etc. A nivel ocupacional se agregan a esta lista otros agentes, como por ejemplo las fibras de asbesto, la anilina o la sílice cristalina.

4.3.9 Mutagénicos

Los agentes mutagénicos son aquellos que pueden producir cambios en la información genética. En consecuencia, pueden inducir en los seres vivos distintos tipos de cambios heredables. Los agentes cancerígenos capaces también de afectar al ADN se designan como **genotóxicos**.

Dependiendo del tipo de alteración genética que se produzca es el tipo de cambio que tendrá el organismo –que tanto puede ser imperceptiblemente pequeño como muy importante–, y a su vez este cambio es susceptible de transmitirse hereditariamente a la descendencia. Las mutaciones suelen ocurrir al azar, por lo que no es posible predecir en cuál gen aparecerá una mutación. Entre los ejemplos más habituales de agentes mutagénicos se incluyen buena parte de las radiaciones. Entre las sustancias mutagénicas de interés ocupacional cabe mencionar el óxido de etileno y el dicromato de potasio.

4.3.10 Teratogénicos

Los agentes teratogénicos producen alteraciones durante el desarrollo de un nuevo organismo, que pueden redundar en malformaciones congénitas anatómicas o funcionales, que muchas veces son de gravedad. Como estos agentes actúan en la fase embrionaria o intrauterina, no implican modificación alguna en la información genética que el nuevo organismo ha recibido (no son genotóxicos).

El caso más conocido históricamente fue el de la talidomida, medicamento administrado masivamente en los años '60 como agente antinauseoso en los primeros meses de embarazo, que dio por resultado el nacimiento de una enorme cantidad de niños con malformaciones graves (en general atrofia o falta de uno o varios de los miembros, tanto superiores como inferiores). Otras sustancias con efectos teratogénicos son los PCB, algunos solventes orgánicos y algunos compuestos orgánicos del mercurio.

4.4 Interacción de agentes tóxicos

Cuando sobre un receptor actúan en forma simultánea varios agentes tóxicos que pueden atacar al mismo sistema, zona localizada u órgano blanco, las respuestas que se obtienen por interacción de tales agentes pueden ser diversas y diferentes a las esperadas como resultado de la acción de cada agente por separado. Los principales casos se presentan a continuación.

También la exposición durante un cierto tiempo puede generar una diferencia en la respuesta esperable a un tóxico. Es lo que se llama **tolerancia**. Es el proceso mediante el cual se genera una **menor respuesta** al efecto tóxico de una sustancia debido a la exposición previa o a ella o a sustancias de estructura química similar. Un ejemplo es el de la tolerancia a los contaminantes atmosféricos en zonas donde ésta es elevada, que se manifiesta como una respuesta reducida en relación a la esperable.

4.4.1 Adición

Se llaman **efectos aditivos** los que resultan cuando dos (o más) agentes tóxicos actúan de modo que sus efectos **se suman**. Es, por ejemplo, el caso de los contaminantes atmosféricos en episodios de contaminación urbana por smog fotoquímico: hay concentraciones elevadas de varios contaminantes que son irritantes respiratorios (ozono, óxidos de nitrógeno, etc.) que actúan todos ellos de manera similar y sus efectos se suman.

4.4.2 Sinergia

Los **efectos sinérgicos** ocurren cuando, por exposición a varios contaminantes a la vez, los efectos que resultan son **superiores o diferentes a la suma** de los efectos individuales de los distintos agentes por separado. Un caso conocido es el de la interacción de alcohol con psicofármacos.

4.4.3 Antagonismo

Estos efectos ocurren cuando la interacción de dos agentes tóxicos genera **efectos menores** – eventualmente nulos- que los que se podría esperar de cada uno de ellos por separado.

Entre los diferentes mecanismos de acción de agentes antagonistas cabe señalar los dos principales: el **antagonismo funcional**, que se corresponde con la idea de efectos aditivos de signo contrario ya que los efectos se producen, pero tienden a neutralizarse entre sí; y el **antagonismo químico**, que ocurre cuando los contaminantes reaccionan entre sí dando como producto un agente menos tóxico o inocho. El manejo de efectos antagónicos es muy usado en medicina clínica para contrarrestar efectos secundarios de medicamentos.

4.4.4 Potenciación

Este fenómeno no es frecuente a nivel de contaminantes ambientales. Ocurre cuando los efectos de un agente tóxico se ven incrementados debido a la presencia de otro agente que no es tóxico, en relación a los efectos que causa cuando se presenta solo. Esto ocurre, por ejemplo, con algunos contaminantes hepatotóxicos o nefrotóxicos.

4.5 Respuestas poblacionales ante agentes tóxicos

Siempre que se trabaja con seres vivos se puede hablar de las respuestas medias esperables, pero las diferencias impuestas por las susceptibilidades individuales pueden ser amplias. En efecto, las respuestas de los diferentes organismos pueden ser distintas ante una misma condición de exposición, puesto que interviene en ella un vasto conjunto de factores individuales que hacen que algunos organismos sean más o menos sensibles, presenten efectos más o menos rápidamente, etc.

Dentro de ciertos límites y en condiciones controladas, hay una relación entre la dosis y la respuesta a un tóxico para cada grupo de organismos. A medida que aumenta la dosis a que se exponen los organismos, en general aumenta también la magnitud del efecto y la cantidad de individuos que lo presentan.

Las previsiones acerca de las respuestas a nivel poblacional se manejan en base a curvas epidemiológicas o ecotoxicológicas, según se esté trabajando con poblaciones humanas o de otros organismos.

4.6 Algunos parámetros ecotoxicológicos

“Una sustancia se dice ecotóxica cuando tiene la capacidad de persistir en el ambiente, de ser absorbida por algún elemento del sistema biótico y de superar los mecanismos homeostáticos del ecosistema incluso a pequeñas dosis, alterando los equilibrios biológicos de éste” (González Machín, S/A).

De acuerdo con la normativa canadiense, una sustancia es **intrínsecamente tóxica para organismos no humanos** cuando se cumple por lo menos una de las siguientes relaciones:

- Toxicidad acuática aguda de $LC(CE)_{50} < 1 \text{ mg/L}$
- Toxicidad acuática crónica de $CSEO < 0,1 \text{ mg/L}$

Siendo: LC = concentración letal; CE = concentración efectiva; CSEO = concentración sin efecto observable (parámetro análogo al NOEL, que se discute más adelante en esta misma sección, pero para concentraciones).

Los ensayos ecotoxicológicos permiten conocer los efectos de un cierto agente sobre los seres vivos, cuantificando el número de respuestas que se tienen ante determinadas dosis. Para que los resultados de estos ensayos sean comparables –como para cualquier otro tipo de ensayo- es necesario que se sigan metodologías normalizadas. Entre los distintos ensayos posibles, los más difundidos son sobre sistemas acuáticos y se realizan a diversos niveles: bacterias bioluminiscentes (***Photobacterium Phosphoreum***, Microtox®); sobre crustáceos (***Daphnia Magna***); sobre peces (***Pimephales Promelas***), sobre algas (***Scenedesmus sp.***). También se hacen ensayos ecotoxicológicos sobre lombrices de tierra, sobre aves, etc.

A continuación, se presentan algunos parámetros ecotoxicológicos de uso corriente.

- **DL₅₀ (Dosis Letal 50 %)**: Es la dosis que ocasiona la muerte al 50 % de la población bajo estudio. También puede hablarse de concentraciones letales $LC_{N\%}$, pero en este caso es necesario dar las condiciones del ensayo para poder evaluar la cantidad de contaminante que recibe el organismo. Las dosis letales DL_N fueron los primeros parámetros ecotoxicológicos que se emplearon. Luego, se fueron incorporando otros parámetros subletales, de corte mucho más preventivo, que son los que actualmente tienen mayor interés en todo lo referente a evaluaciones y gestión ambiental.
- **NOEL (No Observed Effect Level)**: Es la dosis máxima para la cual no se verifican efectos de ningún tipo en la población receptora.
- **NOAEL (No Observed Adverse Effect Level)**: Es la máxima dosis para la que, si bien se verifican efectos, éstos no pueden calificarse como adversos.
- **LOEL (Lowest Observed Effect Level)**: Esta la dosis más baja a la cual se observan efectos. En cada caso debe aclararse qué tipo de efecto se verifica y a qué porcentaje de organismos con respuesta corresponde.
- **LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level)**: Esta es la dosis más baja a la que comienzan a observarse efectos adversos en los organismos en estudio. Se relaciona con lo que también se conoce como “dosis crítica”.
- **ADI (Acceptable Daily Intake o Ingesta Diaria Aceptable)**: Es una concentración admisible para exposición crónica por vía oral, que se emplea para humanos. Se expresa en mg/kg peso/día. Se entiende que una persona que ingiere cierta sustancia durante toda su vida sin superar el nivel de la ADI, no experimentará riesgos para su salud.

4.7 Unidades de Toxicidad (UT)

Se define $1 \text{ UT} = 100/\text{DL}_{50}$, aunque es válido utilizar valores de UT referidos a otros parámetros (como NOEL o LOEL) si se aclara explícitamente. Las UT permiten comparar el potencial de afectación a un sistema biótico de diferentes agentes, a condición de que se cuente con valores de DL_{50} (o de NOEL o LOEL) para las mismas especies y condiciones de ensayo. A modo de ejemplo, en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se presentan los valores de DL_{50} y toxicidad de una misma sustancia y para la misma especie; las primeras están expresadas en mg/kg de peso y las segundas, en UT.

Tabla 4.1. Ejemplo: Valores de DL_{50} en mg/kg peso

| | | DL ₅₀ para ratas, mg/kg de peso corporal | | | |
|-------|--------------------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | | Vía Oral | | Vía Dérmica | |
| Clase | Peligrosidad | Sólidos | Líquidos | Sólidos | Líquidos |
| Ia | Extremadamente peligroso | 5 o menos | 20 o menos | 10 o menos | 40 o menos |
| Ib | Altamente peligroso | 5 – 50 | 20 – 200 | 10 – 100 | 40 – 400 |
| II | Moderadamente peligroso | 50 – 500 | 200 – 2000 | 100 – 1000 | 400 – 4000 |
| III | Ligeramente peligroso | Más de 500 | Más de 2000 | Más de 1000 | Más de 4000 |

Tabla 4.2. Ejemplo: Valores de toxicidad en UT (ref. DL₅₀)

| | | Toxicidad para ratas, en UT ref. DL ₅₀ para ratas | | | |
|-------|--------------------------|--|----------------|---------------|-----------------|
| | | Vía Oral | | Vía Dérmica | |
| Clase | Peligrosidad | Sólidos | Líquidos | Sólidos | Líquidos |
| Ia | Extremadamente peligroso | 20 o más | 5 o más | 10 o más | 2,5 o más |
| Ib | Altamente peligroso | 2 – 20 | 0,5 – 5 | 1 – 10 | 0,25 – 2,5 |
| II | Moderadamente peligroso | 0,2 – 2 | 0,05 – 0,5 | 0,1 – 1 | 0,025 – 0,25 |
| III | Ligeramente peligroso | Menos que 0,2 | Menos que 0,05 | Menos que 0,1 | Menos que 0,025 |

5 Peligrosidad y riesgo de agentes tóxicos

Entre los criterios de evaluación acerca de la significación ambiental de agentes tóxicos, la peligrosidad y el riesgo son dos de los de mayor importancia.

La **peligrosidad** es la característica intrínseca de un agente mediante la que es capaz de ocasionar un efecto adverso o daño a uno o varios componentes ambientales, o a los organismos o ecosistemas expuestos a él. Es inherente al propio agente, independientemente de las cantidades o lugares en los que se emplea. En el caso de sustancias químicas, la peligrosidad depende fundamentalmente de su estructura y de sus características fisicoquímicas (por ejemplo, inflamabilidad, corrosividad, reactividad, etc.).

El **riesgo** es la probabilidad de que ocurra daño a causa de la exposición a un agente peligroso, en circunstancias específicas. Para un mismo agente cuya peligrosidad es conocida, el riesgo fluctúa ampliamente dependiendo de las circunstancias.

Dado que la peligrosidad es una característica propia del agente pero el riesgo se asocia con las situaciones en que dicho agente se presenta -además de con su naturaleza-, se puede tener contaminantes muy peligrosos que sin embargo no representen un riesgo ambiental de importancia, o contaminantes menos peligrosos que impliquen un mayor riesgo ambiental.

5.1 Criterios de riesgo

5.1.1 Volúmenes de producción y de uso

Un agente que es producido en mayor cantidad o que se usa en mayor cantidad tiene más posibilidades de generar efectos nocivos en algún caso.

5.1.2 Formas de exposición

Dependiendo de cómo ocurre la exposición al agente en cuestión, varían las posibilidades de que los efectos nocivos aparezcan o no. Por ejemplo, el uso de protecciones personales en una población trabajadora expuesta a un cierto agente tóxico tiene por objetivo reducir el riesgo de ingreso del tóxico al organismo o, en su defecto, reducir las dosis absorbida y efectiva del agente.

5.1.3 Poblaciones expuestas

Poblaciones o ecosistemas más sensibles o más frágiles o más escasos, expuestos a agentes peligrosos, implican un mayor riesgo, por la mayor importancia de los daños esperables en caso de que dicha población o ecosistema resulte vulnerado por el agente en cuestión.

5.2 Criterios de peligrosidad

Se pueden considerar diversos criterios de peligrosidad ambiental, de los que se enuncian algunos.

5.2.1 Efectos biológicos adversos

Un contaminante se considerará tanto más peligroso cuanto más graves y de mayor alcance puedan ser sus efectos sobre los seres vivos, más allá de que se trate de efectos agudos o crónicos. Por ejemplo, en general se consideran más peligrosos los tóxicos reproductivos que los neumconióticos.

5.2.2 Efectos físicos y químicos en el ambiente

Hay contaminantes cuyos efectos no se manifiestan en forma directa sobre la biota, pero desatan procesos que alteran las características del medio, y son éstas las que luego pueden condicionar las condiciones de supervivencia de los seres vivos.

Los casos de mayor relevancia ambiental, también por la escala geográfica de las consecuencias que con ellos se asocian, son la acidificación del medio por lluvia y deposición ácidas; el agotamiento de la capa de ozono; el calentamiento global por incremento de la presencia de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera.

5.2.3 Persistencia

La persistencia se refiere a la característica de un agente de resistir a la degradación química, fotoquímica y biológica, por lo que su vida media en el ambiente es elevada. Los contaminantes persistentes se suelen designar como “contaminantes conservativos”, lo que implica que en cierta escala de tiempo de trabajo no se tendrán modificaciones en sus características.

Se considera que una sustancia es persistente si su vida media de transformación cumple el siguiente criterio en cualquier medio (ver Tabla 5.1) o si está sujeta a transporte de largo alcance.

Tabla 5.1. Criterios de permanencia en el ambiente para contaminantes persistentes

| Medio | Vida media mayor o igual que: |
|------------|-------------------------------|
| Aire | 2 días |
| Agua | 6 meses |
| Sedimentos | 1 año |
| Suelos | 6 meses |

Los contaminantes naturales persistentes por excelencia son los metales pesados. Dentro de los contaminantes xenobióticos persistentes pueden nombrarse, por ejemplo, los CFC –compuestos clorofluorocarbonados empleados como refrigerantes o propelentes-; los PCB –policloruros de bifenilo, empleados como aceites aislantes en transformadores eléctricos-; los compuestos orgánicos persistentes -que son compuestos organoclorados- COP¹¹, entre otros.

5.2.4 Transformación en el ambiente

Muchas veces no son los agentes que se emplean directamente los más peligrosos a nivel ambiental, sino sus productos de degradación.

Un ejemplo muy conocido es el del DDT (dicloro difenil tricloroetano), un biocida xenobiótico de amplio espectro cuyo uso fue muy difundido en los años '60 – '70 y que actualmente está prohibido en la mayor parte de los países del mundo. El DDT se degrada rápidamente en la Naturaleza, pero su producto de degradación, el DDE (dicloro difenil dicloroetileno), es mucho más tóxico y más persistente que el agente original.

5.2.5 Movilidad ambiental

Se refiere a la posibilidad de un agente de incorporarse a los ciclos biogeoquímicos –y en particular al ciclo del agua- para llegar a sitios distantes del lugar de origen o aplicación con posibilidades de ejercer sus efectos allí. Los contaminantes que presentan gran movilidad ambiental necesariamente son contaminantes con una vida media suficientemente prolongada, puesto que en caso contrario se habrían modificado por algún método antes de moverse. Entre los casos ambientalmente más estudiados están los contaminantes atmosféricos responsables de la acidificación de la lluvia y muchos contaminantes que se transportan por agua, en general metales y biocidas.

Dentro del ciclo del agua, sin dudas la fracción más vulnerable¹² es la que se vincula a las aguas subterráneas, puesto que se están introduciendo contaminantes persistentes y de fácil movilización en un recurso no renovable.

¹¹ A modo informativo, la lista de COPs –que inicialmente incluía únicamente diez compuestos- es actualmente la siguiente:

Plaguicidas: Aldrina, Endrina, Clordano, DDT, Dieldrina, Heptacloro, Hexaclorobenceno, Mírex, Toxafeno, Clordecona alfa-Hexaclorociclohexano, beta-Hexaclorociclohexano, Lindano, Pentaclorobenceno.

Sustancias químicas de uso industrial: Hexaclorobenceno, Bifenilos policlorados (PCBs); Hexabromobifenilo, Hexabromodifenilo y éter de Hexabromodifenilo, ácido perfluorooctano sulfónico, sus sales y fluoruro de perfluorooctano sulfonilo, Éter de tetrabromodifenilo y éter de pentabromodifenilo.

Productos secundarios de procesos: Hexaclorobenceno, Dibenzoparadioxinas policloradas y Dibenzofuranos (PCDD/PCDF), alfa-Hexaclorociclohexano, beta-Hexaclorociclohexano, Lindano, Pentaclorobenceno.

¹² Se entiende por **vulnerabilidad** la propensión de individuos, subpoblaciones específicas u otros grupos (comunidades) de personas o sistemas ecológicos a sufrir daños frente a factores de presión y perturbaciones externos (CCA, 2014). Dicho de otro modo, es la incapacidad de resistir ante el ataque de tales factores.

5.2.6 Origen y tipo de los contaminantes

Se refiere a la naturaleza química de los contaminantes –hay estructuras químicas con mayores o menores efectos en el ambiente- pero por sobre todo hace referencia que los contaminantes sean **naturales** o **xenobióticos**, clasificación presentada anteriormente.

Los **contaminantes naturales** en general se encuentran en cantidades mayores y distribuidos de manera bastante compleja en el planeta, pero en contrapartida, el hecho de que sean naturales implica que existan mecanismos de control, degradación, etc. ya previstos en la Naturaleza.

Los **contaminantes xenobióticos**, al haber sido creados por el hombre, por lo general significan cantidades que pueden conocerse o estimarse, y usos y destinos que también podrían rastrearse y conocerse con algún grado de precisión. Pero por otro lado, la Naturaleza no tiene prevista ninguna forma de actuar sobre ellos, y por lo tanto quien los creó –el hombre- tendrá que ocuparse de la totalidad de su ciclo de vida, incluyendo sus posibilidades de permanecer en el ambiente por largo tiempo y los efectos que entonces pudieran ocurrir, para mitigarlos.

5.2.7 Bioconcentración / bioacumulación / biomagnificación

La **bioconcentración** es la característica de ser más afín a ciertos tejidos orgánicos que al agua, por lo que, estando presente en el medio acuático, la sustancia en cuestión “elige” pasar a dichos tejidos –o sea al cuerpo de los seres vivos- en vez de mantenerse en el agua, lo que la hace susceptible de acumularse en tejidos vivos en concentraciones superiores a las del medio circundante.

El potencial de un contaminante de bioconcentrarse, que es el primer paso para que luego puedan –o no- ocurrir instancias posteriores de bioacumulación y de biomagnificación, se suele cuantificar a través de parámetros tales como el *factor de bioconcentración*, el *coeficiente de partición octanol – agua* y el *coeficiente de partición carbono orgánico – agua*.

- El **factor de bioconcentración (FBC o BCF)** da la relación de concentración de una sustancia química que ha sido absorbida por un organismo a través de todas las vías posibles, y la concentración de la misma sustancia en el medio en que se encuentra (en general, agua). El BCF se determina a partir del estudio de los tejidos de un organismo que ha estado expuesto a agentes bioconcentrables. Aunque es un parámetro de interés en el estudio de ecosistemas expuestos y de cadenas tróficas, carece de valor preventivo.
- El **coeficiente de partición octanol–agua K_{o-w}** es una forma de medir la lipofilia de una sustancia, es decir, la posibilidad que tiene de distribuirse en la fase ambiental orgánica. Se determina en laboratorio, en un ensayo con n-octanol que representa la afinidad de la sustancia con los tejidos orgánicos; esto es lo que define que una sustancia se pueda incorporar a las cadenas tróficas. En el rango de 3 a 6, y especialmente cuando $\log K_{o-w}$ es mayor que 4,3, se asume que las sustancias son susceptibles de incorporarse de manera importante a las cadenas tróficas; en cambio, un bajo valor de K_{o-w} indica compuestos que tienden a distribuirse en el agua o aire y no son afines a las fracciones lipídicas. De acuerdo con la normativa canadiense, una sustancia se dice bioacumulable si su BCF es mayor o igual a 5.000, o si $\log (K_{o-w})$ es mayor o igual que 5.
Existen relaciones que permiten calcular el valor esperable del BCF si se conoce el del K_{o-w} .
- La adsorción de una sustancia en los sedimentos de un cuerpo de agua se puede calcular a partir del **coeficiente de partición carbono orgánico–agua K_{oc}** (también llamado **coeficiente de adsorción**

en materia orgánica), o de otros coeficientes de adsorción análogos. El coeficiente K_{OC} proporciona una medida de la tendencia de las sustancias orgánicas a ser adsorbidas por el suelo y los sedimentos. Un K_{OC} alto indica que el compuesto orgánico tiende a adsorberse en la materia orgánica del suelo, por lo que se espera que llegue poca cantidad del compuesto a las aguas superficiales y a los acuíferos. Un bajo valor de K_{OC} sugiere, por el contrario, que el compuesto tendrá mayor tendencia a movilizarse hacia aguas superficiales o subterráneas. Los valores de K_{O-W} y de K_{OC} presentan una correlación positiva. A su vez, el valor de K_{OC} permite estimar la movilidad en el suelo que presentará la sustancia en cuestión.

La **bioacumulación** ocurre cuando la concentración de un contaminante con capacidad de bioconcentrarse aumenta en los tejidos de un mismo organismo vivo en función del tiempo. Esto muestra que el contaminante, además de bioconcentrarse, tiene la característica de ser de difícil eliminación por el organismo que lo recibe, y por eso las concentraciones en sus tejidos se incrementan con el paso del tiempo.

La **biomagnificación** es el proceso por el cual algunas sustancias pueden ser concentradas sucesivamente en cada eslabón de una cadena trófica. Como resultado, los organismos que están en los niveles más altos de la cadena presentan en sus tejidos concentraciones de contaminante mucho mayores que los organismos que están en la base de la misma. A lo largo del desarrollo de la ecotoxicología se han ido conociendo muchos ejemplos al respecto; un ejemplo clásico por ser de los primeros en analizarse desde este punto de vista es el de la biomagnificación asociada con residuos industriales con metilmercurio en las cadenas tróficas de la Bahía de Minamata, en Japón.

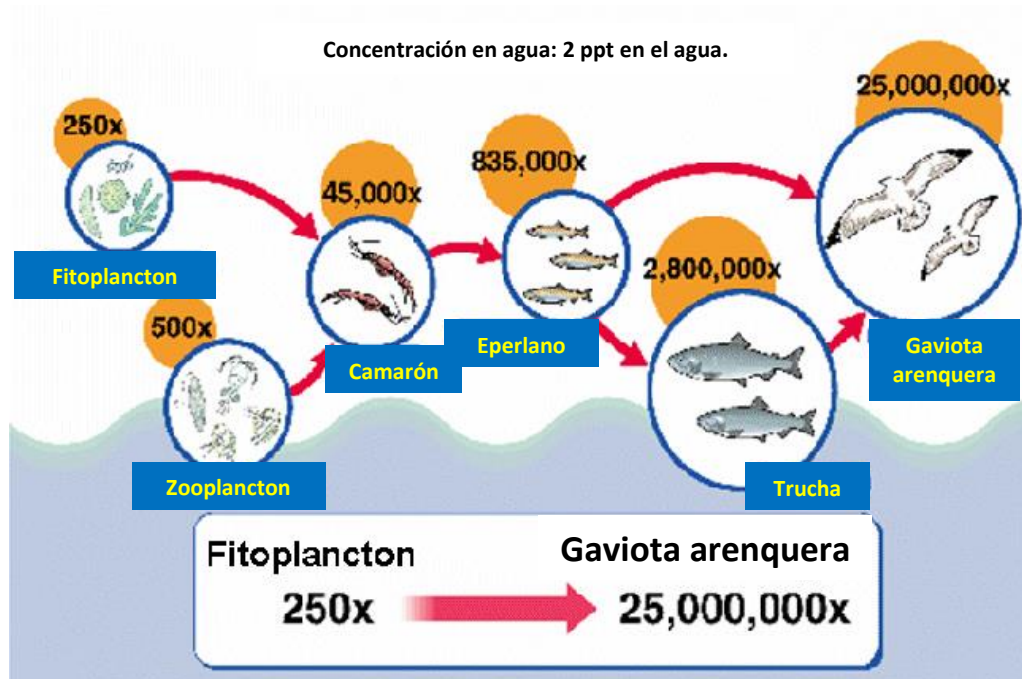


Figura 5.2.1. Ejemplo de biomagnificación: PCBs en el Lago Ontario. Tomado de <https://slideplayer.es/slide/3209638/>

Referencias, bibliografía

Albert, Lilia (Ed.) (1997). Introducción a la Toxicología Ambiental. México: OMS – OPS - Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. 471 pp.

- CCA (2014), Documento marco: caracterización de la vulnerabilidad a la contaminación en América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 58 pp.
- CIEDUR (2019). Producto 5. Artículo de divulgación de la integración de las convenciones de Río. Proyecto URU/16/G32 "Espacios de Coordinación de las Convenciones de Río para un crecimiento sostenible en Uruguay". Montevideo, 2019.
- edafología.fcien.edu.uy (S/A). Erosión.
- Elissalde, Roberto (2017). La cultura como campo de espejismos para el ambiente: la interpretación cultural de la realidad. Rev. Cien. Soc. vol.30 no.41 Montevideo jul. 2017, ISSN 1688-4481.
- Enkerlin, Cano, Garza y Vogel (1997). Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible. México: International Thompson Editores. ISBN: 978-96-875-2902; 714 pp.
- European Commission (2016). Artificial light at night — the impact on plants and ecology. "Science for Environment Policy": European Commission DG Environment News Alert Service, edited by SCU, The University of the West of England, Bristol. Issue 455, 06 May 2016.
- European Commission (2017). Wildflower planting supports a range of beneficial insects, not only bees. "Science for Environment Policy": European Commission DG Environment News Alert Service, edited by SCU, The University of the West of England, Bristol. Thematic Issue 57, June 2017.
- Gobierno de Canadá (2016). Categorización canadiense de las sustancias existentes conforme a la LCPMA de 1999. Taller del Ministerio de Salud de Canadá y de la OPS. Lima, Perú, 8-10 de noviembre de 2016.
- González Machín, Diego (S/A). Definiciones de interés en Toxicología. 44 pp.
- Ibáñez, Juan José. Los Suelos de Uruguay y sus Factores Formadores. Marzo, 2008.
- Luna, Michelle (2016). Diagrama representativo del ciclo del carbono. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Miller, Tyler G. Ecología y Medio Ambiente: introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo. Grupo Editorial Iberoamérica, México. 1992. ISBN: 970-625-027-1. 867 pp.
- MVOTMA CBD DINAMA Punto Focal Operativo. Uruguay. IV Informe Nacional al Convenio sobre la Diversidad Biológica. 113 pp. Agosto 2010.
- Odum, Eugene P. (1985) Fundamentos de Ecología. México: LIMUSA.
- Peña, Carlos E., Carter, Dean E.; Ayala-Fierro, Félix (2001). Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. Distribuido en Internet via Southwest Hazardous Waste Program website at <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>
- PNUMA-DINAMA-CLAES. GEO Uruguay 2008. Informe del Estado del Ambiente.
- Primo Yúfera, Eduardo. Química orgánica básica y aplicada. De la molécula a la industria. Tomo I. Editorial Reverté S.A. – Universidad Politécnica de Valencia, España. Consultado en línea.
- Rivas Mercedes (S/A). Diversidad de biomas y ecosistemas terrestres. CURE - Facultad de Agronomía, UdelaR
- Sánchez, Gabriela; Clérici, Carlos (2020). Resultado de la fiscalización de prácticas inadecuadas detectadas en las campañas de fiscalización (Periodo 2008-2019), del Decreto N° 405/008 de Regulación De Uso y Conservación De Suelos y Aguas Superficiales. Diciembre 2020.
- Soutullo, A.; Clavijo, C.; Martínez-Lanfranco, J.A., Eds. (2013). Especies prioritarias para la conservación en Uruguay. Vertebrados, moluscos continentales y plantas vasculares. SNAP/DINAMA/MVOTMA y DICYT/MEC. 222 pp. Uruguay, 2013. ISBN 978-9974-8259-7-0.
- Universidad de Oviedo (2016). Biomas terrestres, clima y formas biológicas. Apuntes. Revista digital de arquitectura, 2016. <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/>
- Vargas Abarzúa, Esteban; Zúñiga Molinier, Luis. Tiempo y Sucesión Ecológica en Ramón Margalef. ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura CLXXXVI 741 enero-feb (2010) 163-171 ISSN: 0210-1963.
- Zubeldía, José Manuel; Baeza, María Luisa; Jáuregui, Ignacio; Senent, Carlos J. (2012). Libro de las enfermedades alérgicas de la fundación BBVA. Bilbao, España. 487 pp. ISBN: 978-84-92937-15-8.

Sitios web consultados:

- <http://dle.rae.es/>
- <https://elordenmundial.com/mapas/mapa-contaminacion-luminica-mundo/>
- <http://www.fao.org/soils-portal/>
- <https://es.khanacademy.org/science/biology/>
- <http://meteo.fisica.edu.uy/>
- <http://mgap.gub.uy/Renare/>
- <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/>
- <http://www.osman.es/diccionario/>
- <http://www.uprm.edu/>