

**FUNDACION PARA EL FOMENTO EN ASTURIAS
DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA
APLICADA Y LA TECNOLOGICA
F.I.C.Y.T.**

**CONTAMINACION
E
INGENIERIA AMBIENTAL**

*Dirección científica y coordinación
(Universidad de Oviedo)*

**Julio L. Bueno
Herminio Sastre
Antonio G. Lavín**

*Asesoría Técnica
Lucas Leiva (Consultor)*

Oviedo, 1997

Ecología de los sistemas acuáticos: Parámetros biológicos de las aguas continentales

RICARDO ANADON ALVAREZ

1. INTRODUCCION

Los ecosistemas acuáticos presentan una enorme diversidad: océanos, mares costeros, bahías y estuarios, manglares, pantanos, lagos, embalses, estanques, charcas. También engloba a ríos y arroyos en los que se manifiesta un movimiento unidireccional del agua desde las partes altas a las bajas. A pesar de ello, todos tienen algunas características comunes derivadas de las propiedades físicas y químicas del medio, que motivan que muchos procesos sean convergentes y, por ello, se puedan describir pautas comunes de funcionamiento.

Entre las propiedades del agua que conviene mencionar se encuentra su calor específico que motiva que los cambios de temperatura presenten límites reducidos en comparación con el medio terrestre. Otra característica importante es la densidad del agua, similar a la de los organismos (una parte de la masa de los organismos es agua). Asimismo, el hecho de que la mayor densidad del agua se alcance cerca de los 4 °C y que para valores superiores e inferiores la densidad disminuya, provoca una organización vertical característica. La elevada viscosidad del agua respecto al medio atmosférico implica propiedades comunes en las formas de los organismos y en sus actividades locomotoras y alimentarias (pueden existir partículas disueltas y en suspensión, hecho que no ocurre en sistemas terrestres). Esta situación confiere la posibilidad de una organización tridimensional a los sistemas acuáticos, Figura 1.

Una característica importante, relacionable con la organización tridimensional de los sistemas acuáticos, es la distribución de la luz en dichos medios. El hecho de que la energía radiante sea absorbida por el agua motiva una pérdida de irradiancia en profundidad, Figura 2. Si además de la absorción por el agua existen materiales en suspensión, la pérdida de luz en profundidad puede ser muy rápida, existiendo, por tanto, grandes volúmenes de agua en los que no existe producción orgánica y sí existe respiración.

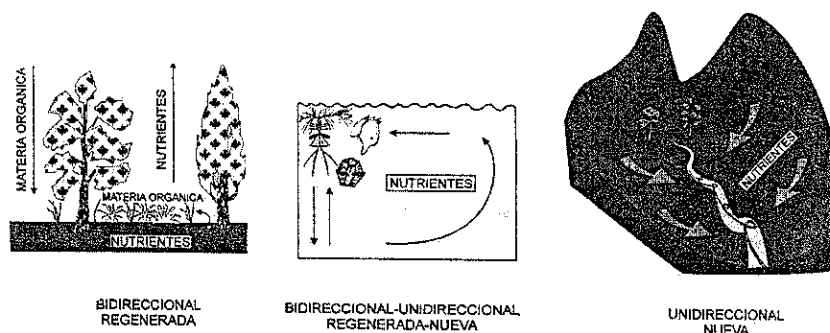


Figura 1. Esquema comparativo del flujo de nutrientes y materia orgánica en:
 A) Sistemas terrestres.
 B) Sistemas marinos.
 C) Sistemas límnicos.
 La espiral en el río representa el flujo de nutrientes que puede ocurrir por etapas al poder pasar a los organismos de rivera.

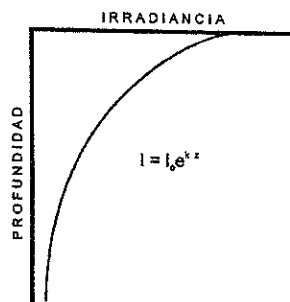


Figura 2. Curva de extinción de la luz en el agua.
 k: Tasa de extinción de la luz; I_0 : Irradiancia superficial, I_z : Irradiancia a la profundidad z; z: Profundidad en metros.

El hecho de que en el agua el transporte de materiales disueltos se realice de forma primordial mediante mecanismos de difusión, y que ésta tenga valores reducidos, provoca que exista una fuerte interrelación entre los organismos y la concentración de los elementos mayoritarios de la materia orgánica en el agua. Los materiales particulados (organismos o partículas), sin embargo, pueden moverse de una manera significativa relativamente a los movimientos del agua, y por tanto, constituyen un importante mecanismo de transporte en medios acuáticos.

Una propiedad que diferencia los sistemas acuáticos es el contenido en sales de cada cuerpo de agua. La salinidad afecta, en su aspecto físico, a la densidad y al punto de congelación (a 35 °C el punto de congelación es -1,91 °C); secundariamente, las

modificaciones de salinidad pueden implicar desplazamientos de masas de agua debidos a gradientes de densidad (circulación termohalina). Desde el punto de vista biológico las diferencias de salinidad implican necesidades diferentes desde el punto de vista osmótico, teniendo algunos organismos que eliminar agua constantemente, mientras que los que viven en medios muy salinos necesitan eliminar sales.

Otra diferencia se puede encontrar en la composición de las sales disueltas. En el agua marina existe una proporcionalidad casi constante entre las sales, y desde este punto de vista sólo se pueden diferenciar por el contenido total. En los medios continentales, sin embargo, existen grandes diferencias: se pueden encontrar desde sistemas hipersalinos con un alto contenido en sales (p.e. en el Mar Muerto sales potásicas) a sistemas en el que el agua es prácticamente destilada (originada por deshielo de nieve). La composición cualitativa de sales disueltas es diversa y depende del sustrato sobre el que circule el agua o se infiltren las aguas profundas.

La última diferencia reseñable se relacionaría con la tasa de renovación del agua. Sería elevada en sistemas lóticos (ríos y arroyos), menor en sistemas lénticos (charcas, embalses, lagos) y más reducida en sistemas marinos (estuarios, mares interiores, aguas costeras, aguas oceánicas).

2. LOS ECOSISTEMAS CONTINENTALES Y MARINOS

Por los aspectos reseñados en la Introducción se puede sospechar que el tipo de organismos que existen en los medios acuáticos deben diferir de los organismos terrestres en la forma y en algunas características fisiológicas.

Otra faceta que diferencia a los sistemas acuáticos y terrestres es la distancia existente entre las zonas de producción y respiración, por lo general mucho mayores en medios acuáticos. Estas diferencias generan una estructura vertical con zonas de consumo de nutrientes y otras de mineralización que, generalmente, impiden el reciclado de los nutrientes en el mismo sistema (o al menos en períodos de tiempo similares), dependiendo la producción de procesos de fertilización no controlables por el sistema, Figura 3.

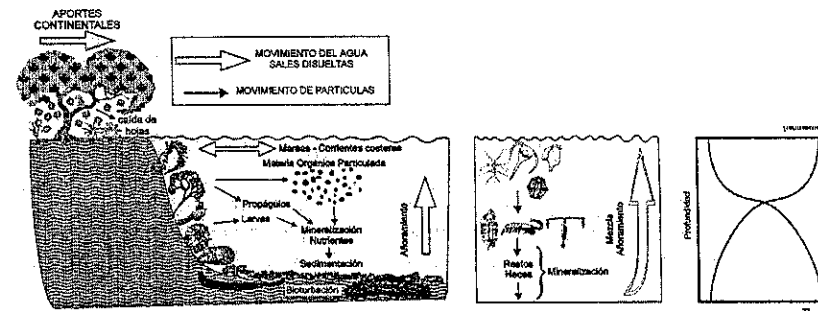


Figura 3. Movimientos relativos de las sales disueltas (igual que el agua) y las partículas en sistemas acuáticos. Se representa la dinámica en aguas costeras (A) y en aguas profundas (B), así como la distribución de la temperatura y los nutrientes en zonas estratificadas (C).

Se pueden diferenciar cuatro tipos de sistemas en función del tipo de organismos que los constituyen y de los procesos dominantes en los mismos

a. Sistemas Pelágicos

Engloba comunidades constituidas por organismos que pueden tener desplazamiento activo o pueden ser movidos por el agua, Figura 4. En general, todos los sistemas pelágicos dependen de la producción primaria del microplancton autótrofo (fitoplancton o bacterioplancton), aunque también pueden existir macrófitos (Sargazos, lentejas de agua, etc.). La producción primaria queda limitada a la capa de agua iluminada (capa fótica).

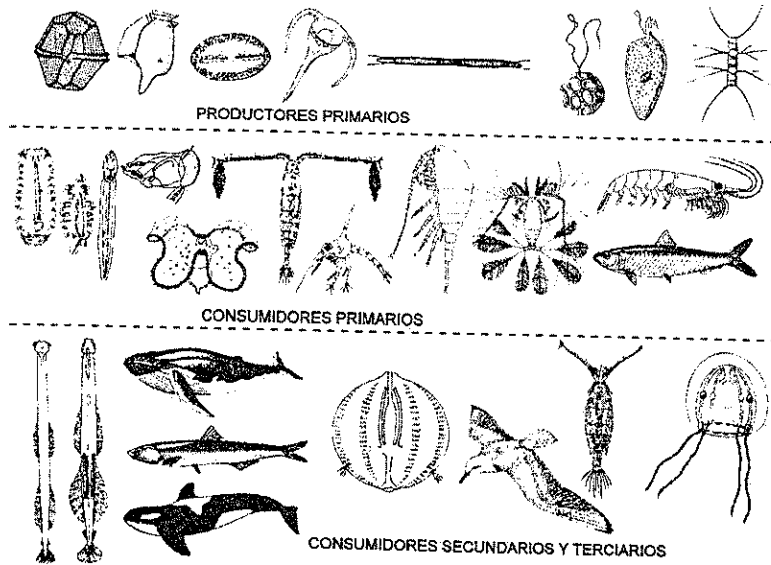


Figura 4. Algunos ejemplos de organismos característicos de sistemas pelágicos.

Los materiales producidos en la capa fótica son consumidos en parte en la misma, y el exceso de producción respecto a consumo es transferido a las capas oscuras (que reciben menos del 0,1% de la radiación incidente) donde es consumida o sedimenta.

Los consumidores pelágicos pueden capturar el alimento de forma activa (tiburones, quetognatos serían casos extremos). También pueden alimentarse filtrando el agua y reteniendo organismos o partículas en suspensión mediante estructuras especializadas (barbas de ballena, casa de Apencilarias, apéndices de crustáceos, etc.); esta forma de alimentación se encuentra en organismos pertenecientes a muy diferentes categorías taxonómicas y tamaños (ballenas, copépodos, salpas, etc.).

Se encuentran sistemas pelágicos en mares, océanos, lagos y embalses. En los medios fluviales no se encuentran comunidades pelágicas bien desarrolladas, debido a los problemas de expatriación de los individuos

b. Sistemas Bénticos

Engloba comunidades constituidas por organismos que a lo largo de todo su ciclo de vida o al menos en la fase adulta, residen en el interior del sedimento (la infauna y la meiofauna), o sobre el mismo (epifauna). También incluye a organismos que residen una parte importante del ciclo diario en el bentos (organismos bentoplanctónicos) o utiliza como fuente alimentaria a organismos del bentos (p.e. necton demersal), Figura 5.

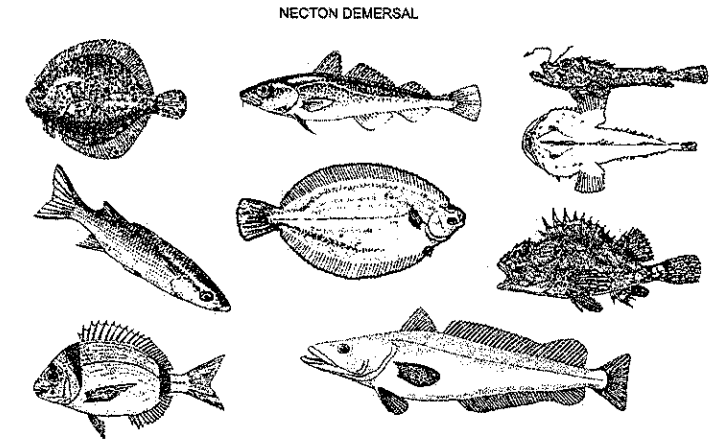


Figura 5. Algunos ejemplos de organismos característicos del necton demersal.

Tiene como característica distintiva que la fuente de materiales y energía es externa al propio sistema, no siendo controlada por organismos de la propia comunidad. La fuente de materiales orgánicos es el sistema pelágico; en áreas próximas a la costa y en lagos son importantes los aportes de materiales de origen terrígeno o procedentes de las comunidades de los márgenes. Sólo en aquellas áreas poco profundas, a las que llega una radiación suficiente, tienen producción primaria autóctona.

La dependencia de materiales alóctonos, que pueden variar en cantidad y calidad, genera diferencias en la biomasa sostenible que, sin considerar el talud continental donde pueden existir aportes de la plataforma (en el caso de los océanos), disminuye con la profundidad. La base de la estructura trófica de estas comunidades está constituida, por tanto, por detritívoros que tienen la capacidad de utilizar los materiales sedimentados. Generalmente se descomponen en dos categorías: sedi-

mentívoros que utilizan los materiales ya depositados recojiéndolos en la superficie del sedimento, o ingiriendo también la fracción inorgánica, y *suspensívoros* que recogen los materiales en su caída o resuspendidos, Figura 6.

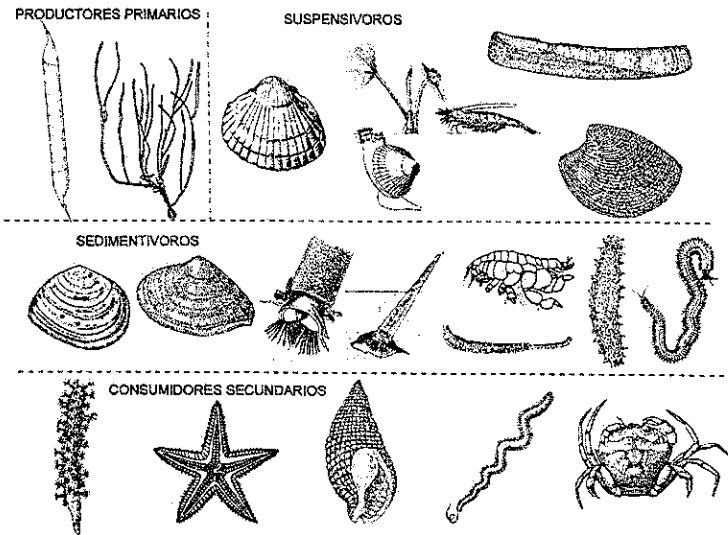


Figura 6. Algunos ejemplos de organismos característicos de sistemas benthicos

Los organismos de la infauna pueden fabricar tubos o cavidades que los aíslan de un medio agresivo como es el sedimento. Los organismos de la epifauna pueden ser sésiles (fijos a un sustrato) y en general filtradores, o móviles (con capacidad de desplazamiento) pudiendo ser filtradores o no. En esta última categoría se incluyen los peces, cefalópodos u otros organismos cuya fuente de alimento principal es el bentos.

Existen sistemas benthicos en aquellas áreas en las que existe deposición de material, principalmente en mares, océanos y lagos. Un efecto que limita las posibilidades de desarrollo de los organismos del bentos son las corrientes; esto motiva que en sitios de fuerte corriente las comunidades estén empobrecidas, y por la misma razón en ríos de flujo lento (con mayores posibilidades de sedimentación) se pueden desarrollar comunidades más ricas que en aquellos ríos de flujo rápido.

c. Sistemas de márgenes

Los márgenes de los ambientes acuáticos (en la interfase con el medio terrestre) pueden ser ocupados por vegetación fija al sustrato, constituyendo comunidades características, Figura 7. La fuente de materiales es la producción primaria de la vegetación. Los tipos de vegetación que se pueden desarrollar son muy diferentes: macroalgas, fanerógamas sumergidas de agua dulce o marinas, manglares,

marjales, macrofitos sumergidos con hojas flotantes. También se pueden englobar comunidades de sustratos duros, roca, bloques, cantos, en los que se desarrollan microfítos, que son consumidos por organismos rascadores.

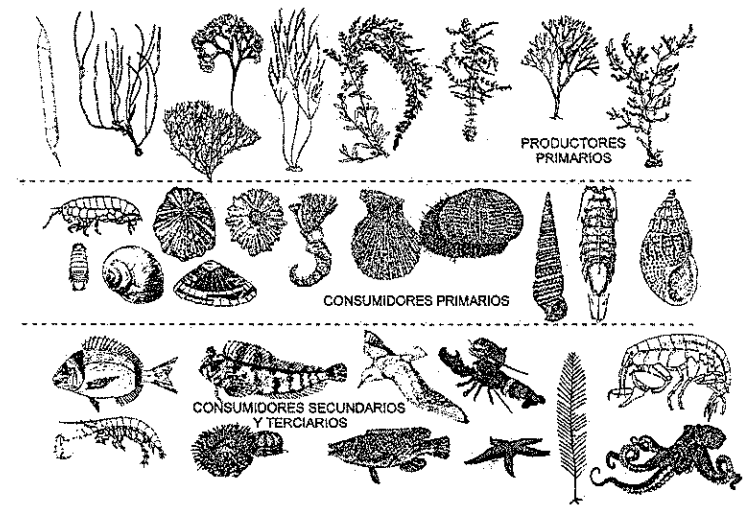


Figura 7. Algunos ejemplos de organismos característicos de sistemas de márgenes.

Debido a las diferencias existentes entre los distintos tipos de comunidades se pueden realizar pocas generalizaciones. Al ser comunidades de bordes dependen de los movimientos del agua para los aportes de nutrientes y exportan una parte sustancial de la producción, que puede ser utilizada por el bentos. Las comunidades benthicas próximas a comunidades de márgenes pueden tener un aporte importante de materiales y adquirir gran desarrollo. Debido a encontrarse fijas a un sustrato las plantas reciben una radiación predecible, por lo que pueden adaptar su maquinaria fotosintética a la cantidad y calidad de la luz incidente.

La vegetación puede producir tejidos y acumular biomasa. En comunidades sostenidas por fanerógamas una gran parte del material no puede ser utilizado directamente (celulosas, ligninas), y sólo puede ser usado en una primera fase por bacterias y hongos (descomponedores). En comunidades sostenidas por macroalgas (y sus epifítos) o microfítos la biomasa puede ser utilizada directamente por los consumidores.

d. Arrecifes coralinos

Son sistemas sostenidos por una relación simbiótica entre madreporarios hermatípicos (formadores de arrecifes debido a su esqueleto carbonatado) y microalgas (zooxantelas) que viven en el interior de los pólipos. El sistema está sostenido por la producción primaria de las zooxantelas, algunos macrofitos y por los organismos pelágicos capturados por los madreporarios u otros organismos (filtrado-

res o depredadores). La fuente de nutrientes es el agua circulante y el agua profunda que puede ascender por el interior del arrecife, así como parte de los elementos obtenidos de las presas capturadas por los pólipos, lo que permite una elevada producción y un uso muy eficiente de los materiales sintetizados.

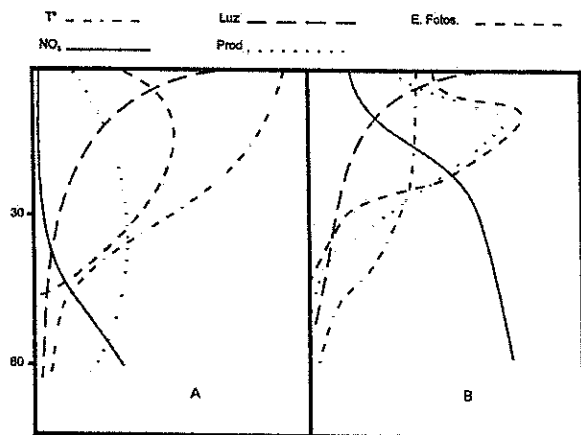


Figura 8. Esquema idealizado de la variación en profundidad (metros) de: temperatura, nitrato, luz, producción y eficiencia fotosintética (se relaciona con la distribución de la luz y los nutrientes) en ambientes estratificados (A) y no estratificados (B).

Este tipo de sistemas está restringido a medios marinos de latitudes bajas, debido a la necesidad de unas condiciones ambientales estables y con temperatura elevada, lo que facilita la formación de los esqueletos carbonatados. También necesita aguas limpias para que penetre la luz y las zooxantelas puedan realizar la fotosíntesis.

3. ORGANIZACION TROFICA DE LOS ECOSISTEMAS ACUATICOS

3.1. Productores

Los productores primarios en medios acuáticos usan como fuente energética principal la luz, aunque puede encontrarse quimioautotrofia (p.e., en húmeros negros ligados a dorsales oceánicas en los que existen aportes de metales reducidos, Fe₂O₃ o MnO₂).

La distribución de la luz en profundidad sigue una función exponencial decreciente:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot z}$$

donde

I₀ = Irradiancia en superficie

z = Profundidad

k = Coeficiente de extinción de la luz

Además de la pérdida de irradiancia en profundidad también cambia la composición espectral de la luz, tanto por las diferencias en la absorción por el agua de distintas longitudes de onda (penetra más el azul) como por el efecto de materiales en disolución y/o suspensión. Algunos ecosistemas como los ríos ecuatoriales de llanura, que llevan en suspensión una gran cantidad de partículas minerales, tienen una capa iluminada muy poco profunda (a veces menor de 1 m) y con una composición espectral hacia el amarillo y el rojo.

Como resultado de esta distribución se debe esperar que la eficiencia fotosintética (relación entre radiación fijada por la fotosíntesis y la radiación incidente fotosintéticamente activa) presente un máximo a profundidades intermedias, Figura 8. Pero estos máximos se pueden concentrar en los primeros metros de la columna de agua o alcanzar más de 40 m de profundidad, dependiendo de la extinción de la luz. La fuente de materiales, las sales nutrientes, es menos predecible, puesto que depende de las tasas de consumo y liberación a partir de la materia orgánica, del desplazamiento de las partículas (de forma general en sentido descendente) y de los movimientos del agua.

En la columna de agua pueden describirse dos situaciones:

- Cuando existen movimientos verticales se encuentra una distribución más o menos homogénea de los nutrientes en profundidad así como una distribución homogénea de la temperatura, Figura 9; aunque, si la columna de agua es profunda, siempre aparece un incremento paulatino de la concentración por debajo de la zona fótica (resultado de la mineralización lenta de los materiales que sedimentan). El desplazamiento vertical puede producirse por *mezcla*, cuando no existen diferencias de densidad en la columna de agua, o por *advección*, cuando las aguas superficiales son desplazadas ocupando su lugar aguas profundas ricas en nutrientes; estas situaciones se conocen como afloramientos, Figura 10. Los afloramientos producen un enriquecimiento de las aguas superficiales y un incremento de la producción.

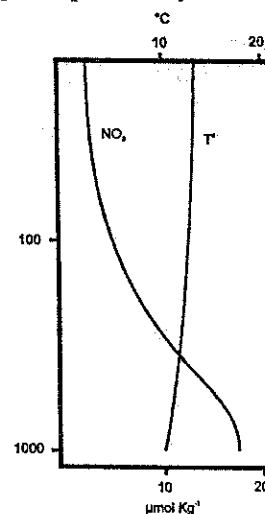


Figura 9. Distribución de la temperatura y los nutrientes en una columna de agua mezclada.

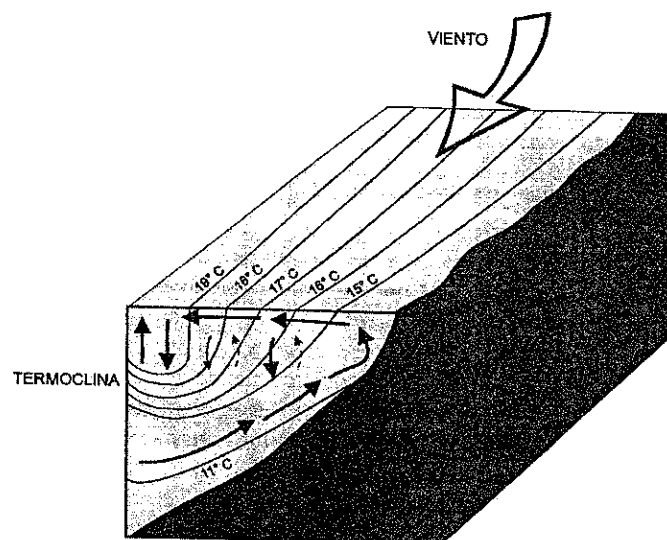


Figura 10. Esquema idealizado de un proceso de afloramiento. Se indican los movimientos del agua y la distribución de las isotermas resultantes.

— Cuando la columna de agua es estable y está estratificada (con elevados gradientes de densidad en la parte superficial de la columna de agua, los procesos de consumo y mineralización se localizan a diferente profundidad. En superficie predominan los procesos de síntesis de materiales orgánicos, por lo que se produce un déficit de nutrientes, mientras que en profundidad se produce un enriquecimiento debido a la sedimentación y mineralización de los materiales sintetizados en superficie.

Si el período de estabilidad se prolonga durante un período suficientemente largo de tiempo los nutrientes de la capa superior de la columna de agua pueden llegar a desaparecer, limitando de forma casi total la fotosíntesis. La producción en estos casos se concentra en la nutriclina (ligada casi siempre a la termoclina o gradiente brusco de temperatura en profundidad), Figura 11.

En ecosistemas fluviales la distribución de los nutrientes se relaciona más directamente con la interacción con el medio terrestre que rodea al cauce que con la propia actividad de los organismos acuáticos.

En la interfase con los sedimentos se producen problemas importantes desde el punto de vista de la distribución de nutrientes. Entre ellos se puede citar la retención de fósforo o la desnitrificación en sedimentos anóxicos de agua dulce. Es difícil hacer generalizaciones debido a la complejidad de los intercambios que se producen en la interfase agua-sedimento.

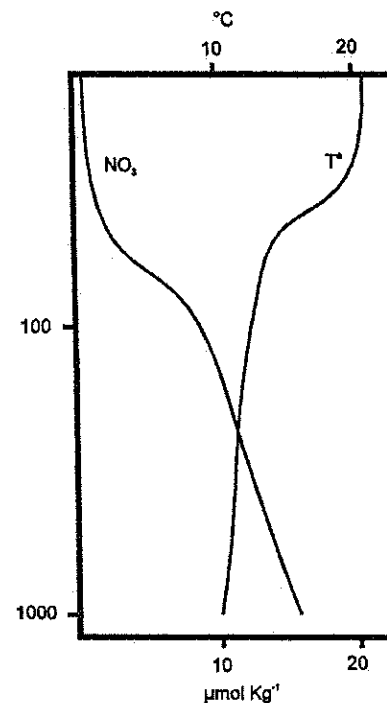


Figura 11. Distribución de la temperatura y los nutrientes en una columna de agua estratificada.

En respuesta a los factores antes mencionados, a la turbulencia del medio y a si están fijos o no a un sustrato los vegetales acuáticos han adquirido morfologías características en cada medio (tipos biológicos). Los tipos biológicos de productores primarios planctónicos dependen de la turbulencia y la concentración de nutrientes (mándala del plancton) como queda representado en la Figura 12. Los tipos biológicos de los vegetales fijos a un sustrato son muy variados: en las fanerógamas marinas se pueden distinguir tipos biológicos como los indicados en la Figura 7.

La distribución de la producción primaria en diferentes sistemas acuáticos se presenta en la Tabla 1. Se puede apreciar que los sistemas más productivos se encuentran en las zonas de interfase entre el medio acuático y el terrestre (estuarios, comunidades del bentos, marjales y manglares), en los que el aporte de nutrientes es elevado. La menor producción se encuentra en océano abierto y en el medio pelágico de lagos, sobre todo en aquellos en los que por estar siempre estratificados (amícticos) no existe renovación de nutrientes provenientes de capas profundas (producción nueva) sino que provienen de la regeneración de nutrientes en la capa fótica (producción regenerada).

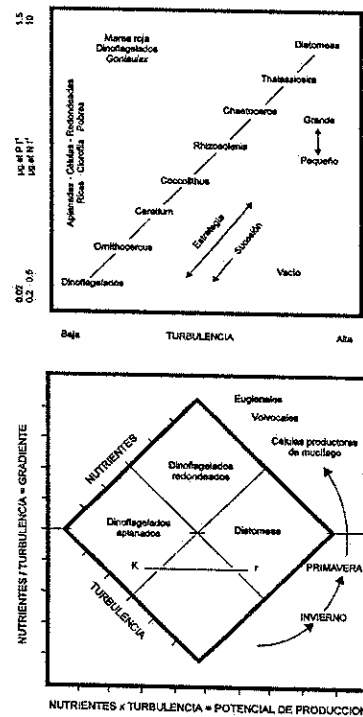


Figura 12. Distribución de los tipos biológicos del fitoplancton de acuerdo con la "mándala" del fitoplancton propuesta por Margalef

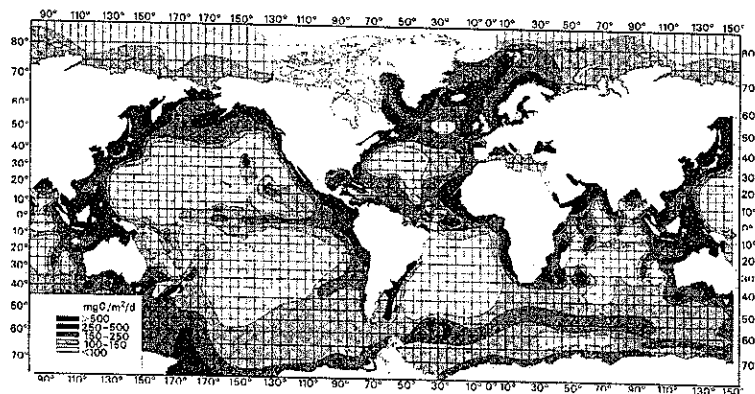


Figura 13. Distribución de la producción primaria en los océanos según Whittaker

Tabla 1
Producción primaria neta de distintos ecosistemas acuáticos, así como su biomasa media y el área que ocupan en la Tierra

Tipo de ecosistema	Área (10 ⁶ km ²)	Biomasa media (g.m ⁻²)	Producción primaria neta (g.m ⁻² año ⁻¹)	
			Rango	Media
Océano abierto	332,0	3	2 - 400	125
Zonas de afloramiento	0,4	20	400 - 1000	50
Plataforma continental	26,6	10	200 - 600	360
Estuarios	1,4	1000	200 - 3500	1500
Comunidades de bentos	0,6	2000	500 - 4500	2500
Marjales y manglares	2,0	15000	800 - 3500	2000
Lagos y ríos	2,0	20	100 - 1500	250

En la Figura 13 se aprecia que las zonas de mayor producción se concentran en las zonas costeras, y dentro de éstas en los márgenes orientales de los océanos, zonas en las que se producen los afloramientos de agua profunda más importantes tanto en extensión como en duración. Aparte de estos procesos de gran escala, actualmente se presta una gran atención a procesos muy energéticos pero de escala reducida, como frentes, filamentos, giros, etc. Todos ellos provocan movimientos de ascenso del agua, generando el enriquecimiento del agua superficial.

La reducida extensión geográfica de estos procesos y su variabilidad espacial y temporal motivó que con los métodos clásicos (estaciones fijas de muestreo) no fueran reconocidos ni valorada su importancia. Con métodos de muestreo en continuo y mediante el uso de sensores remotos (satélites) se ha comprobado la importancia de muchos de estos procesos, sobre todo cuando se encuentran ligados a procesos de plataforma; en este caso pueden actuar como barreras que impiden el intercambio de agua y materiales entre costa y océano, o facilitar la transferencia de materiales entre diferentes masas de agua, Figura 14.

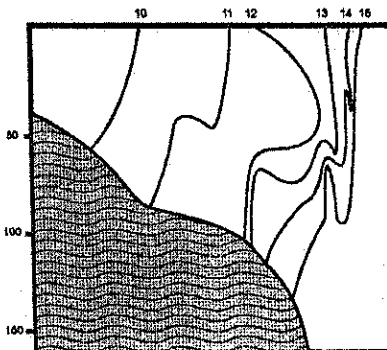


Figura 14. Esquema idealizado de la distribución de las isotermas (en "C") en un frente e plataforma.

3.2. Consumidores

Los materiales sintetizados por los productores primarios y no respirados por éstos, la *producción primaria neta*, puede ser utilizado por otros organismos: los consumidores. Los consumidores pueden ser clasificados en varias categorías. Por el nivel trófico que ocupen: herbívoros, carnívoros primarios, carnívoros secundarios, detritívoros. En cada una de estas categorías habría que diferenciar los organismos pelágicos de los bénticos

Otra forma de clasificación sería en *microfagos* y *macrófagos*. La microfagia hace referencia a organismos que no capturan a sus presas de forma individualizada, sino que la captura se realiza de forma poco discriminante. En este grupo podrían encontrarse organismos filtradores, sedimentívoros, rascadores, pacedores; cada uno de estos grupos tienen morfologías especializadas al tipo de alimento que capturan

La macrofagia implicaría la detección y captura de presas específicas, por lo que la alimentación puede ser muy selectiva. Los organismos macrófagos necesitan disponer de órganos sensoriales para la detección de las presas y de capacidad de discriminación entre diferentes tipos o especies de presa y el tamaño de las mismas. Además, deben de disponer de medios para capturar las presas. En general, se reconocen dos tipos de estrategia de captura: la captura activa y la captura al acecho.

La actividad de los consumidores se relaciona con la disponibilidad de presas y con la calidad de éstas como alimento. La calidad de una presa se mediría por varios parámetros, entre los que se encuentra su accesibilidad para el depredador, la concentración relativa de los materiales que constituyen la presa, y de la capacidad del depredador para metabolizar los compuestos presentes en la presa.

El primer aspecto se refiere a la abundancia de las especies presas; si una presa es de buena calidad pero escasa el depredador debiera dedicar poca atención a su búsqueda, pero capturarla si la encuentra. La capacidad críptica de las presas, sus morfologías defensivas (espinas, esqueletos externos, etc.) y la presencia de sustancias tóxicas o que reduzcan la eficiencia digestiva de los depredadores actuarían como limitadores de la predación. En estos casos es claro que tanto la crípsis como la defensa química y/o física se valoran con relación a cada depredador específico

Los microfagos, al alimentarse por lo general de conjuntos de presa, no son muy selectivos con el alimento ni responden a la abundancia de recursos de una forma específica, p.e. cambiando su localización; las especies consumidas por filtradores tampoco pueden desarrollar mecanismos muy específicos de defensa química puesto que el depredador no tendría mecanismos de discriminación sobre el organismo causante.

Una primera aproximación a la calidad de los alimentos es la relación entre Carbono y Nitrógeno (C/N) que posean; esta relación permite valorar la importancia de las proteínas frente a glúcidos y lípidos. Dado que las proteínas son sustancias clave para la actividad orgánica y para la reproducción, los alimentos con un bajo valor de esta relación (entre 3 y 8) tendrían una elevada calidad, mientras que cuanto más elevado es el índice los alimentos tendrían menor calidad. Tiene relación este índice con la existencia de celulosa o lignina en las paredes celulares, sobre todo de vegetales, que son

sustancias de difícil asimilación (mediada en todo caso por bacterias y hongos) lo que motiva una baja eficiencia de transformación. También se relaciona con materiales detritícos previamente utilizados, puesto que los materiales que permanecen son refractarios a la actividad de las enzimas digestivas y por tanto poco energéticos.

Con estas premisas, se puede concluir que el tipo de alimento consumido por un heterótrofo influye de forma decisiva en el flujo general de materiales, y que, por tanto, la eficiencia general de un sistema (su capacidad para sostener biomasa) dependería en principio del tipo y cantidad de materiales sintetizados por los productores primarios, o de los aportes de materiales al sistema (en aquellos sistemas heterotróficos como el bentos).

Se puede hacer una gradación entre los diferentes tipos de consumidores por la eficiencia de transformación de los materiales, que englobaría la eficiencia de captura, la eficiencia de asimilación y el gasto respiratorio.

Con la menor eficiencia se encontrarían los microfagos detritívoros. Capturan un alimento de baja calidad y difícil asimilación, con una relación C/N entre 7 y 60; los mismos recursos son utilizados por bacterias y hongos que, al tener un elevado gasto respiratorio, no transfieren una cantidad importante de materiales. La eficiencia de consumo puede encontrarse en valores próximos al 15 o 20% o menores, mientras que la eficiencia de asimilación se encuentra por el 20%.

Los herbívoros tendrían una eficiencia mayor, puesto que se alimentarían de materiales de mayor calidad. Dado que los productores primarios en sistemas acuáticos presentan relaciones C/N muy contrastadas (entre 4 y 40), los rangos para los valores de eficiencia de transferencia sería muy amplio. Desde herbívoros que se alimentan de fitoplancton, con un relación C/N entre 4 y 10, los que consumen macroalgas, con un C/N entre 8 y 20, los que consumen angiospermas, con un C/N entre 14 y 40. La eficiencia de consumo de herbívoros acuáticos se puede encontrar entre el 4 a 7% en consumidores de angiospermas, el 5 al 25% en consumidores de macroalgas, el 40-80 de los rascadores microbívoros o el 25-80 en los herbívoros planctófagos. Las eficiencias de asimilación pueden encontrarse entre el 40 y el 80%, dependiendo de la calidad del material ingerido

Un tipo especial de consumidor está constituido por los descomponedores, fundamentalmente bacterias y hongos. Sus principales peculiaridades residen en:

- No tener capacidad para acumular biomasa debido a su elevado gasto respiratorio
- Posibilidad de utilizar sales inorgánicas (nitrato, fosfato) para sintetizar macromoléculas.

Debido a esta última característica tienen capacidad para utilizar como recurso materiales orgánicos con muy bajo contenido en Nitrógeno y Fósforo, a los que enriquecen en estos elementos.

Poseen, además, enzimas celulolíticas que les permite descomponer celulosas y ligninas, lo que les convierte en un eslabón intermedio imprescindible de las vías detrití-

cas. De hecho, se discute en la actualidad el significado de las bacterias sujetas a substratos orgánicos como fuente alimentaria de detritívoros.

Un primer paso en la descomposición lo realizarían los animales que fragmentan las partículas (desmenuzadores), p.e. macroinvertebrados de río que fragmentan las hojas caídas al cauce; esta fragmentación aumentaría el valor de la relación superficie/volumen de las partículas, lo que favorecería el ataque de los descomponedores. A su vez, éstos enriquecerían los materiales ya digeridos previamente, incrementando su calidad como alimento (las bacterias tienen una relación C/N próxima a 3).

4. REDES TROFICAS ACUATICAS

Como ya se indicó en el apartado 2 se pueden clasificar los sistemas acuáticos a partir de los procesos dominantes en los mismos. A la vista de lo indicado en los apartados 3.1 y 3.2. se puede suponer que cada una de los sistemas antes mencionados tendría un tipo específico de productores y de consumidores, o lo que es lo mismo, se podrían distinguir pautas diferentes en el flujo de materiales a través de la red trófica; el flujo de energía dependería del tipo de materiales sintetizados por los productores primarios y por la capacidad de los consumidores para transmitir ésta a niveles tróficos superiores.

En los sistemas pelágicos, basados en la producción primaria del fitoplancton, la calidad de los materiales producidos para los consumidores es elevada. La transferencia de materiales también es elevada por término general en aquellos ambientes en los que la producción es temporalmente estable, p.e. en mares estratificados. Sin embargo, en aquellos sistemas en los que la producción es pulsante, p.e. en un sistema de afloramiento, la capacidad de aprovechamiento de los materiales es menor, perdiéndose una parte importante hacia el bentos. Las cadenas tróficas que se pueden sustentar con una baja eficiencia ecológica (relación entre la energía de un nivel trófico en relación con la del anterior) son cortas, a pesar que la fotosíntesis sea mucho más elevada que en sistemas de producción reducida y estable. En estos últimos sistemas los balances entre la Producción y la Respiración (P/R) se aproxima a 1, mientras en sistemas fluctuantes el valor es superior a 1,5.

En el sistema béntico el aprovechamiento de los materiales depende de las tasas de sedimentación de materiales orgánicos, Figura 15. Cuando la tasa de sedimentación es muy elevada se puede consumir el oxígeno disuelto, por lo que se reduce la actividad de los organismos. En estas condiciones se produce una acumulación de materiales en el sedimento.

Si la tasa de sedimentación no es muy elevada los organismos pueden consumir una parte importante de los materiales. Además la actividad de los sedimentívoros puede provocar una intensa bioturbación, permitiendo la oxigenación del sedimento y facilitar el ataque bacteriano, por lo que la concentración de materiales orgánicos del sedimento puede ser muy baja.

Los organismos del bentos pueden ser consumidos por peces u otros organismos (morsas, ballenas), retornando parte de los materiales al medio pelágico.

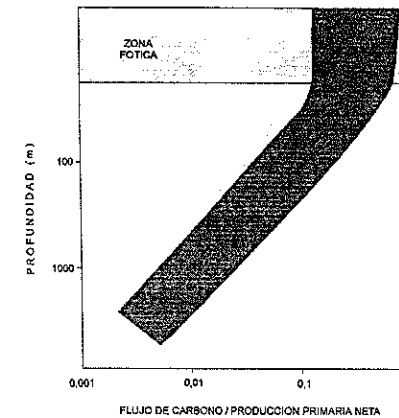


Figura 15. Relación entre la producción primaria neta y el flujo de carbono a diferentes profundidades.

En el caso de sistemas fluviales la estructura trófica se modifica a lo largo del río. En las partes altas existe producción primaria interna y aporte de hojas del dosel (materia orgánica de buena calidad). Estos recursos son utilizados por raspadores y desmenuzadores. Aguas abajo, cuando los cauces se hacen más anchos, se reduce el dosel de vegetación y la producción autóctona al incrementarse los materiales en suspensión. En esta situación tienden a predominar los filtradores, los sedimentívoros y los descomponedores.

En los sistemas de márgenes, la mayoría de los materiales sintetizados son exportados a otros sistemas. Los consumidores están constituidos por herbívoros raspadores, en general de pequeño tamaño. Otros herbívoros aprovechan la producción de microfitos epífitos o pueden utilizar frondes recién desprendidas (erizos de mar). Los carnívoros están constituidos por animales que pueden abrir o perforar los esqueletos externos (estrellas de mar, moluscos perforadores). Parte de los productores secundarios pueden ser utilizados por depredadores que ocupan de forma parcial o temporal estos ambientes, como pueden ser pájaros, peces y algunos mamíferos. Un caso especial lo constituyen las praderas de fanerógamas sumergidas que son consumidas por las vacas marinas o sirénidos, en mares cálidos.

En el estudio de las redes tróficas marinas se ha venido prestando poca atención al papel de las bacterias. Las dificultades para evaluar su biomasa y producción resultaban un freno para su estudio. El desarrollo reciente de metodologías para estimar de una forma rápida estos parámetros ha permitido realzar la importancia de este grupo de organismos.

En el medio pelágico una parte de los materiales orgánicos presentes están en forma disuelta. Aunque se conoce que un amplio grupo de organismos acuáticos tienen capaci-

dad de asimilar compuestos disueltos por los tegumentos, su importancia en la dieta suele ser limitada. No es éste el caso de las bacterias, que además de hacer uso de este recurso (no bien evaluado en la actualidad), pueden utilizar los materiales particulados. Se conoce que una parte significativa (entre el 10 y el 60%, aunque existe controversia sobre los valores reales) de los materiales sintetizados por los vegetales acuáticos puede ser "exudado" directamente como materia orgánica disuelta. La existencia de bacterias que pueden crecer activamente a partir del recurso y transformarlo en partículas, permite que dichos materiales puedan regresar a la vía trófica clásica, al ser consumida por microfla-gelados, e incluso por filtradores tan eficientes como las apendicularias. Esta vía trófica se conoce como "bucle microbiano". No se conoce de una forma tan precisa la significación del bucle microbiano en sistemas bénticos debido a la dificultad para discriminar la producción bacteriana dependiente de materiales disueltos o particulados

5. ORGANISMOS INDICADORES

El hecho de que existan organismos característicos de diferentes ambientes, incluidos los de ambientes modificados por el hombre (tal como se mencionó en el Capítulo I.I.), ha permitido utilizar a los organismos como indicadores de ambientes y de la calidad del agua. El uso de organismos indicadores ha sido más frecuente en lagos y ríos que en el océano, porque en este último muchas veces es difícil reconocer el origen del agua y, por tanto, cuáles pueden ser las sustancias o procesos que pueden haber influido en la composición de las comunidades.

Sin embargo, en aguas continentales esta influencia es más directa, y puede ser reconocida utilizando los organismos como indicadores. La primera cuestión que se plantea es la definición de cuáles son las condiciones *naturales* de un ambiente y cuáles las comunidades naturales que existen. Se asume que para determinadas áreas geográficas y situaciones concretas (p.e. parte alta de un río) existen organismos característicos, el nivel taxonómico al que se pueden reconocer puede ser diverso, desde el nivel específico al de familia. Será la ausencia de algunos de estos grupos o la presencia de otros no característicos los que indicarán que existen modificaciones en el ambiente. La idea de especies indicadoras se ha utilizado de diversas maneras:

- Especies que acumulan sustancias tóxicas, por lo que el análisis de los tejidos permite tener una idea de las concentraciones a las que están expuestas.
- Especies que desaparecen (o aparecen) o cambian su densidad relativa (generando cambios en la estructura de la comunidad) cuando están sometidas a determinados polutantes o niveles de contaminación

Estos diferentes puntos de vista ha llevado a que se apliquen diversas denominaciones a los organismos indicadores: especies clave, especies críticas, centinelas, detectores y acumuladores entre otras.

Los organismos indicadores se han utilizado como herramienta en estudios de control de calidad del agua. Los organismos actúan como sensores continuos (las sustancias químicas pueden presentar oscilaciones muy acusadas en su concentración) pero, en general, poco específicos (la misma respuesta se puede conseguir con diferentes sus-

tancias). Presentan, sin embargo, la ventaja de la facilidad de muestre la determinación de muestras, por lo que son métodos muy adecuados la situación de la calidad del agua en cuencas.

La elección del tipo de organismos depende de los objetivos del mente se han utilizado todos los grupos de organismos como indicar más usados son las bacterias (indicadoras de contaminación fecal), brados (presentan muchas formas sedentarias que los hace útiles con los efectos de los polutantes) y las algas (útiles en estudios de eutrofi están bien documentados los cambios en las comunidades, tanto en l estructura (abundancia relativa de especies).

Como ejemplo de organismos indicadores se presentan algu macromvertebrados en la Figura 16.

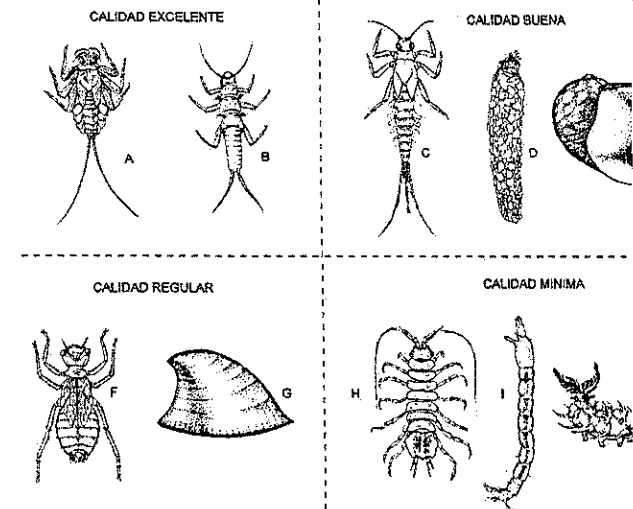


Figura 16. Algunos ejemplos de organismos indicadores de la calidad de las aguas se considera que un agua tiene la calidad del organismo indicador de mayor calidad. Existen, sin embargo, otros índices de calidad que consideran la totalidad de lo.

6. SENSIBILIDAD DEL ECOSISTEMA A LA ACCION DEL

6.1. Extracción: pesca

La extracción de individuos y biomasa de una especie implica niveles:

- Se modifican los parámetros demográficos de la población, distribución de edades (tamaños) y su tasa reproductiva.

- Se modifica el flujo energético del sistema, sobre todo si la especie extraída es abundante en el ecosistema.

Como fórmula más sencilla para analizar la explotación de una población analizaremos una relación simple explotador-explotado. Se puede valorar cuál sería la o las situaciones en las cuales la densidad de la población se encontraría en equilibrio. Si la tasa de crecimiento de una especie explotada es una función de su propia densidad, Figura 17, se puede deducir que para que no se reduzca su densidad la tasa máxima de captura podrá, a lo sumo, ser igual a su tasa de crecimiento. La tasa máxima de captura (extracción máxima sostenible) correspondería a la densidad a la que la tasa de crecimiento es máxima, Figura 17. Si la población manifiesta fluctuaciones, sean éstas dependientes o independientes de la densidad, es obvio que la extracción máxima sostenible no sería un valor constante, sino que dependería de la dinámica de la población. En estas condiciones es fácil que se supere la extracción máxima sostenible, lo que puede provocar una reducción en la densidad de la población, a veces con resultados catastróficos sobre la misma (p.e. la sardina de California, los espáridos de la aguas saharianas).

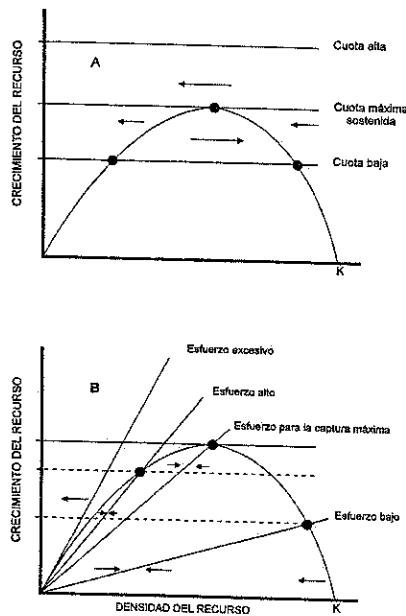


Figura 17. Captura máxima sostenible, asumiendo un crecimiento del recurso dependiente de su propia densidad, de acuerdo a dos modelos.

A) Modelo de cuotas fijas. B) Modelo de esfuerzo constante. Las flechas representan la tendencia en la densidad del recurso en función de la cuota de captura o del esfuerzo realizado. Los puntos en los que la captura se iguala al crecimiento señalan puntos de equilibrio (las flechas a ambos lados de la curva de crecimiento son divergentes) o estables (las flechas a ambos lados de la curva de crecimiento son convergentes). Estos modelos sencillos pueden servir como introducción al problema de la regulación de las capturas.

Si esta relación se da en un medio en el que coexisten múltiples especies el análisis es más complejo. Además de la capacidad de crecimiento de la población explotada, hay que tomar en consideración los cambios que se producen en las especies que poseen capacidad para explotar recursos similares a la especie extraída. La extracción de una especie reduce su biomasa y la talla de los individuos, por lo que reduce el consumo de sus recursos. Los recursos no consumidos pueden ser, y lo son en muchos de los casos estudiados, consumidos por otras especies que incrementan su número. El resultado final de estas alteraciones puede ser un cambio en la composición de las comunidades, de las que pueden desaparecer las especies más valiosas económicamente (las más explotadas) con los perjuicios evidentes de la flota que explote el recurso.

Una vez establecida la extracción máxima sostenible se pueden regular la extracción por diversos medios:

- Fijando cuotas de captura, es decir, repartiendo lo que se considera puede ser explotado entre las diversas flotas.
- Limitando la capacidad de extracción de los pescadores, regulando las artes usables o el tamaño de éstas (incluido el tamaño de la malla)
- Limitando el tiempo o las zonas de captura (vedas).

El desarrollo de instrumentos que permiten la localización exacta de los peces, su localización por sensores remotos o el desarrollo de artes muy versátiles o de gran tamaño ha multiplicado la capacidad extractiva de las flotas, provocando una disminución de la densidad de muchas de las poblaciones de peces explotadas.

A estos problemas se le añade el de la propiedad del recurso. Al originarse los peces en un medio natural, sin intervención humana, no existe otro sistema de propiedad que la declaración de soberanía de un espacio alrededor de las costas. Cada uno de los países explotadores pretenderá obtener el máximo de recurso posible. A pesar de que se han creado organismos internacionales (dependientes de la FAO) cuyo objetivo es la regulación de la extracción, no siempre se respetan las restricciones impuestas (cuotas, artes utilizables, vedas) al defender cada gobierno sus propios intereses. Esta situación lleva a que la extracción se maximice, provocando el rápido descenso de las poblaciones explotadas.

En algunas partes del océano (p.e. Atlántico nororiental) no se incrementa la extracción a pesar de aumentarse el esfuerzo de captura, lo que hace suponer que se ha superado la extracción máxima sostenible; algunas de las especies más solicitadas están mostrando un descenso acusado de las capturas (merluza, besugo) mientras aumenta la extracción de especies menos apreciadas. Este descenso, y la sustitución de especies consiguiente puede llegar a la extinción del recurso. En algún caso, como la caza de ballena franca, la situación puede llevar a la extinción de la especie recurso.

6.2. Degradación

La degradación de los sistemas acuáticos por acción antrópica depende en primer lugar de la capacidad de dilución de cada sistema. En el caso de los ríos depende del caudal relativo de los vertidos y del propio río. En el caso de los lagos depende del volumen del lago, de la relación entre la superficie y el volumen, y de la frecuencia de

los períodos de mezcla. En el caso de de las áreas costeras, depende de las condiciones hidrográficas particulares y del volumen y concentración de los vertidos

Además, influye la capacidad del propio sistema para procesar (descomponer, eliminar, etc.) las sustancias introducidas, lo que se llama *capacidad de asimilación*. Dado que existen muy diversos tipos de sustancias no se pueden realizar generalizaciones. La capacidad de asimilación será reducida siempre que la sustancia no sea degradable (biológica o químicamente) o no pueda almacenarse en una forma inactiva (retirada en sedimentos, quelación, etc.). También hay que tener en cuenta si los aportes incluyen una o varias sustancias, y en este caso si pueden tener efectos sinérgicos o no.

Se puede afirmar que la actividad del hombre está modificando los sistemas a gran escala, puesto que los aportes se realizan por muy diversas vías: residuos agrícolas (provocan eutrofización, caso de los abonos, o en mortalidad de poblaciones, caso de los pesticidas), residuos industriales de muy diversa índole (provocan la mortalidad de poblaciones, la extinción de especies y la desorganización de los sistemas acuáticos) y residuos urbanos (provocan eutrofización).

A la acción de sustancias eliminadas hacia los sistemas acuáticos hay que añadir la degradación provocada por acciones directas sobre los propios sistemas, sobre todo como obras de ingeniería. La modificación de cauces mediante la construcción de embalses, diques o muros de contención, que modifican sustancialmente los regímenes de circulación y la cubierta vegetal son causantes de drásticas modificaciones en las comunidades naturales, generalmente provocando su simplificación y homogeneización.

Otros tipos de acciones como las urbanizaciones masivas del litoral, la construcción de diques costeros sin control de las corrientes, y las consiguientes modificaciones de los regímenes de éstas y de los procesos de sedimentación en áreas próximas, pueden tener efectos importantes sobre las poblaciones del litoral.

Todas estas influencias están bien establecidas en sistemas con una influencia antrópica directa e intensa, como ríos, áreas marinas confinadas, lagos y embalses. Sin embargo, cada vez son más perceptibles procesos de mayor escala, cuyas causas no están bien establecidas. Todo apunta a que son el resultado de alteraciones en los organismos (estrés, malformaciones) provocados por efectos sinérgicos de sustancias xenobióticas que se encuentran en el medio en forma muy diluida.

Entre todos los procesos de degradación de sistemas acuáticos mencionaremos algunos que son importantes por la extensión geográfica en la que se manifiestan:

- Acidificación de lagos y ríos resultado de la lluvia ácida (algunos lagos del norte de Europa son prácticamente abióticos).
- Eutrofización de lagos, estuarios y mares confinados (provocan grandes mortalidades de peces y se relacionan con mortalidades de mamíferos marinos).
- Cultivos marinos a gran escala (modifican la composición de las comunidades naturales de la zona).
- Creación de playas o su "restauración" (destruyen las comunidades del área en la que se realiza la restauración y de la que se extraen los sedimentos).
- Desaparición de arrecifes de coral provocada por el incremento de la turbidez del agua.

7. BIBLIOGRAFÍA

- BARNES, R.S.K., MANN, K.H., "Fundamentals of aquatic ecology", Blackwell Sci.Publ., Oxford, 1991
- BARNES, R.S.K., HUGHES, "An introduction to marine ecology", Blackwell Sci.Publ., Oxford, 1982
- CARTER, R.W.G., "Coastal environments", Academic Press, Oxford, 1988
- CUSHING, D.H., "Ecología marina y pesquerías", Ed. Acribia, Zaragoza, 1975.
- FINCHAM, A.A., "Biología marina básica", Ed. Omega, Barcelona, 1987.
- HELLAWELL, J.M., "Biological surveillance of rivers", Water Res.Center Publ., 1978.
- HUTCHINSON, G.E., "A Treatise on Limnology. I. Geography, Physics, and Chemistry", John Wiley & Sons, Nueva York, 1957
- HUTCHINSON, G.E., "A Treatise on Limnology. II. Introduction to Lake Biology and the Limnoplankton", John Wiley & Sons, Nueva York, 1967.
- HUTCHINSON, G.E., "A Treatise on Limnology. III. Aquatic macrophytes and attached algae", John Wiley & Sons, Nueva York, 1975.
- LAEVASTU, T., HAYES, M.L., "Fisheries oceanography and ecology", Fishing News Books Ltd., Farnham
- LAWS, E.A., "Aquatic pollution", John Wiley & Sons, Nueva York, 1981
- MANN, K.H., LAZIER, J.R.N., "Dynamics of marine ecosystems", Blackwell Sci.Publ., Oxford, 1991
- MANN, K.H., "Ecology of coastal waters. A system approach", Blackwell Sci.Publ., Oxford, 1982.
- MARGALEF, R. (ed.), "Estudio y explotación del mar en Galicia", Publ. Univ. Santiago Compostela, 1979
- MARGALEF, R., "Limnología", Ed. Omega, Barcelona, 1983.
- MAY, R.M. (ed.), "Exploitation of Marine Communities", Springer-Verlag, Berlin, 1984
- OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT TASK FORCE, "Wastes in Marine Environments", Hemisphere Publ.Corp., Cambridge, 1988.
- OPEN UNIVERSITY, "Seawater: its composition, properties and behaviour", Open University, 1989
- OPEN UNIVERSITY, "Ocean circulation", Open University, 1989
- OPEN UNIVERSITY, "Ocean chemistry and deep-sea sediments", Open University, 1989.
- OPEN UNIVERSITY, "Case studies in Oceanography and marine affairs", Open University, 1989
- SHERMAN, K., ALEXANDER, L.M., GOLD, B.D., (ed.), "Food chains, yields, models, and management of large marine ecosystems", Westview Press, Boulder, 1991.
- STOWE, K., "Ocean Science", John Wiley & Sons, Nueva York, 1983.
- THIBAUT, M., BILLARD, R., "Restauration des rivières à saumons", INRA, Paris, 1987.
- STUMM, W., MORGAN, J.J., "Aquatic Chemistry", John Wiley & Sons, Nueva York, 1981
- VALIELA, I., "Marine ecological processes", Springer-Verlag, Nueva York, 1989
- WETZEL, R.G., "Limnología", Ed. Omega, Barcelona, 1981
- WHITTON, B.A. (ed.), "River ecology", Blackwell Sci. Publ., Oxford, 1975
- WHITTON, B.A., "Ecology of European rivers", Blackwell Sci.Publ., Oxford, 1984