

CAPÍTULO 3 DESARROLLO CONCEPTUAL

Para poder realizar un modelo se deben tener en cuenta las diferentes propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del medio que se pretende modelar, pudiendo llegar a determinar una contaminación del río. Así que este capítulo está orientado para aportar al lector, no experimentado en el tema, los conceptos básicos del medio que se quiere modelar y su legislación. Se recomienda que el lector experto omita este tema y avance al capítulo 4.

3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

En este apartado se presentan las características físicas y parámetros que determinan el comportamiento del agua.

3.1.1 Propiedades misceláneas del agua

El agua se caracteriza por:

- Una viscosidad relativamente baja, fluye con facilidad.
- Es poco compresible, las relaciones presión - densidad no son importantes.
- Disuelve muchas y variadas sustancias.

La dependencia entre la solubilidad con la temperatura se muestra en la figura 3.1 y de la cual se puede observar que el comportamiento de la solubilidad del agua varía según la fase en que se encuentre.

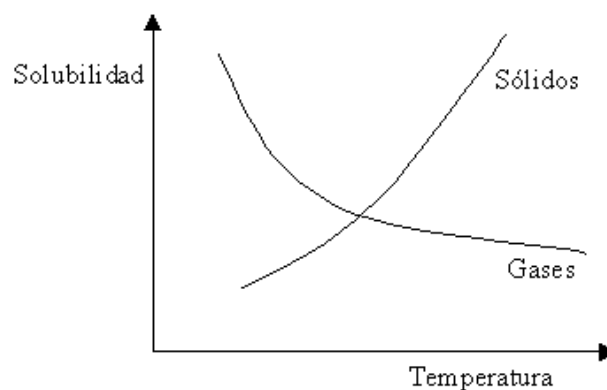


Figura 3.1: Curvas genéricas de solubilidad en función de la temperatura (Gadalmes,2000).

En el caso del agua en fase gaseosa la solubilidad aumenta como menor es la temperatura. Lo contrario sucede con la fase sólida, como es esperable.

3.1.2 Propiedades térmicas del agua

El comportamiento térmico del agua es único en varios aspectos, esto se debe principalmente a que los enlaces intermoleculares que forma el agua son muy fuertes. Estos enlaces tan fuertes provocan que el agua tenga los puntos de ebullición y de fusión bastante elevados, a pesar de ser una sustancia que tiene un peso molecular tan bajo.

En primer lugar es importante destacar el calor específico (C_p). Este indica la energía calorífica que se necesita suministrar para elevar un grado la temperatura. El agua tiene una alta capacidad calorífica, (tabla 3.1). Es decir hace falta mucha energía calorífica para variar la temperatura del agua un grado. Consecuentemente, las grandes masas de aguas tienen un importante efecto regulador de la temperatura ambiental.

Tabla 3.1: Calor específico del agua en función de su estado.

Estado	C_p (Cal/g, °C)
Líquido	1
Sólido	0.5

Entonces para elevar la temperatura, de 0° a 100°, de un gramo de agua se necesita suministrar 100 calorías, y para hacerlo evaporar se necesita 539 calorías. Esto conlleva que el comportamiento de una masa de aire al enfriarse sea característico y se muestra en la figura 3.2.

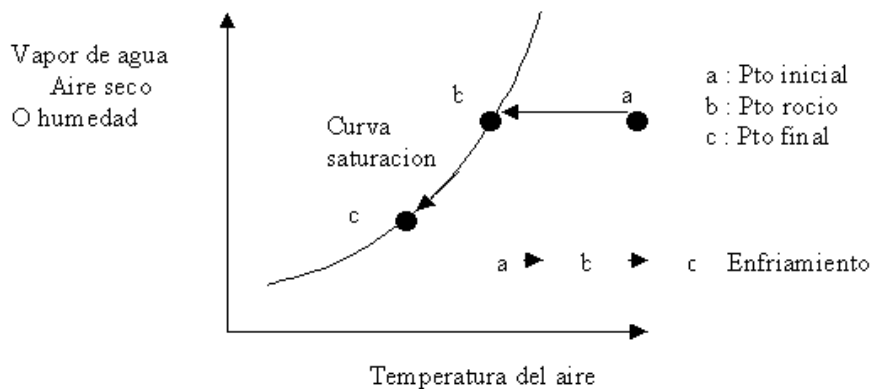


Figura 3.2: Comportamiento de la humedad absoluta del aire al bajar la temperatura.

Donde se puede observar que,

- a→b: Enfriamiento sin condensación.
- b→c: Condensación de una cierta cantidad de vapor de agua.

Al producirse la condensación del vapor de agua, entrega una gran cantidad de calor. Esta entrega de calor, provoca el enfriamiento del aire al punto de rocío, ya que el aire es muy resistente a disminuciones de temperatura. Por último cabe observar también que el calor de fusión del agua (79,71 Cal/g a 0°C) es una cifra alta para sustancias similares.

Con respecto a la conductividad térmica del agua, que es la capacidad para conducir el calor, supera a la de todas las otras sustancias líquidas naturales, exceptuando a la del mercurio.

La última característica que depende de la temperatura es la densidad del agua y que disminuye con la temperatura. Para entender este concepto se muestra un ejemplo en la figura 3.3, donde se genera una estratificación térmica. Este fenómeno sucede sobretodo en lagos.

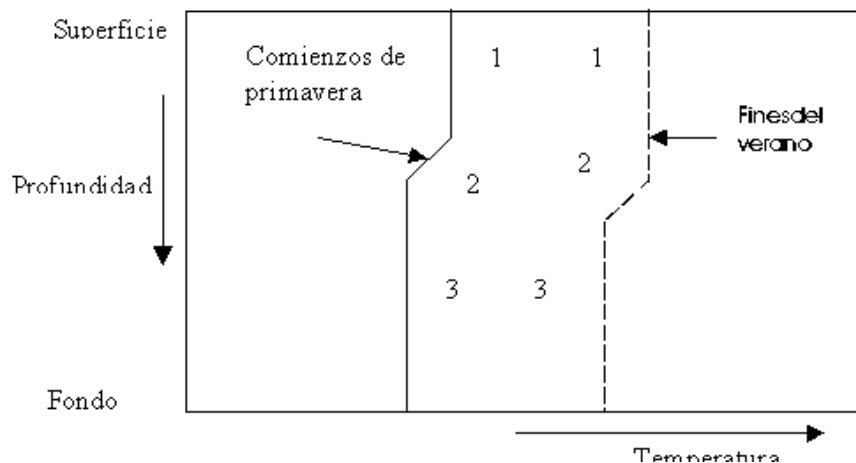


Figura 3.3: 1: Capa superficial: Epilimnion; Temperatura relativamente alta 2: Capa de transición: Mesolimnion o termoclina; alto $\Delta T/\Delta Z = 0,75^{\circ}\text{C}$. 3: Capa inferior: Hipolimnion; Temperatura relativamente baja (Galdames, 2000).

3.2 CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA

La calidad química del agua viene determinada por las sustancias inorgánicas químicas presentes. Estas sustancias pueden tener varios orígenes y que conllevan diferentes consecuencias al medio acuoso. El origen y el tipo de estas sustancias, sus efectos y los métodos de medida es muestra en este apartado.

Sustancias inorgánicas disueltas en aguas

El tipo de sustancias que se encuentran en el agua son las más mayoritarias, no solo en el medio acuoso sino en toda la naturaleza, ya que se engloban las sustancias gaseosas y las iónicas. En particular, el agua adquiere una gran variedad de constituyentes inorgánicos mediante el contacto con el ambiente. Por ejemplo el agua en contacto con la atmósfera se adquieren gases, en contacto con la tierra se adquieren minerales y en contactos con ambientes antrópicos se adquieren metales pesados tóxicos.

En las aguas naturales, existen solo siete constituyentes inorgánicos principales que están presentes en concentraciones elevadas. Estos constituyentes principales son muy importantes porque estabilizan la calidad química de las aguas naturales. Las aguas continentales naturales tiene unos valores de pH entre 7 – 9 y en las aguas de los océanos unos valores de pH entre 8 - 8,4. Cabe destacar que en general los dos tipos de aguas, continentales y oceánicas, en condiciones naturales tienen una concentración bajísima de metales pesados tóxicos.

Fuentes de sustancias inorgánicas en aguas naturales

Existen diversos tipos de fuentes para la adición de diferentes elementos inorgánicos al agua natural, como son los iones inorgánicos, las sustancias en suspensión y los gases inorgánicos.

a) Fuentes de iones inorgánicos

Debido al contacto de la lluvia, que es ligeramente ácida, con la tierra genera una serie de reacciones y que se diferencian por el tipo de composición del material rocoso que entra en contacto.

- Roca Caliza: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ (Bicarbonato)
- Roca Dolomítica: $\text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ (Bicarbonato)
- Roca Feldespática, con la que se genera Caolinita:



En general, casi todas las aguas naturales contienen principalmente los cationes Calcio, Magnesio, Sodio y los aniones Bicarbonato, Sulfato y Cloruro, obteniéndose unos valores típicos de partículas inorgánicas y que se muestran en la tabla 3.2. Este tipo de sustancias inorgánicas disueltas genera una serie de efectos en la química de las aguas naturales estabilizando el pH.

Tabla 3.2: Concentraciones de iones inorgánicos mayoritarios en aguas superficiales (Gadalmes, 2000).

Iones	Rango (Mg / L)	Media (Mg / L)
A) Constituyentes principales ($\sim 10^{-3}\text{M}$)		
Ca^{2+}	10 – 100	40
Mg^{2+}	2 – 50	10
Na^+	5 – 200	30
HCO_3^-	50 – 400	230
Cl^-	2 – 200	16
SO_4^{2-}	2 – 200	30
$\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$	6 – 70	20
B) Constituyentes menores ($\sim 10^{-4}\text{M}$)		
K^+	1 – 10	2
Sr^{2+}	< 5	0.1
Fe^{2+}	< 5	0.1
Mn^{2+}	-	-
NO_3^-	< 10	1
F^-	< 4	0.2
PO_4^{3-}	-	-
C) Constituyentes trazas ($< 10^{-5}\text{M}$)		
Muchos elementos caen dentro de esta categoría		

Además de los niveles naturales de iones inorgánicos, las aguas naturales pueden recibir altas concentraciones de ciertos iones inorgánicos como resultado de actividades industriales, agrícolas y domésticas, como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Iones inorgánicos generados por actividades antrópicas (Gadalmes, 2000).

Actividad	Iones descargados
Industria de recubrimientos metálicos	Zn, Cd, Cr, Ni
Industria de pintura	Ba, Pb
Pesticidas	As, Hg
Fertilizantes, detergentes, aguas residuales domésticas	N, P

Para este estudio nos centraremos en analizar las sustancias formadas por N y P generadas por actividades agrícolas con fertilizantes, por detergentes y por aguas residuales domésticas.

Efectos de las sustancias iónicas inorgánicas

Algunos contaminantes inorgánicos generan diferentes efectos como se puede ver en la tabla 3.4. Los efectos que provocan son considerados importantes para la sociedad ya que son los que pueden provocar intoxicaciones a gran escala.

Tabla 3.4: Efectos de algunos contaminantes inorgánicos sobre la salud (Gadalmes, 2000).

Contaminante	Efecto
Arsénico	Envenenamiento (vómitos, diarrea, dolores, cáncer, calvicie)
Cadmio	Nauseas, contracciones musculares, vómitos, diarrea, daño al riñón, posiblemente cáncer.
Mercurio	Nauseas, vómitos, puede conducir a condiciones crónicas que simulan desordenes psíquicos: irritabilidad, miedo, depresión, dolores de cabeza, fatiga, inhabilidad, miedo, depresión, dolores de cabeza, fatiga, amnesia, insomnio.
Nitrato, nitrito en el estomago	Nitrito puede provocar la asfixia en infantes (Metahemoglobinemia)

Las solubilidades de los metales también vienen determinadas por el valor del pH. La estabilidad del pH, de las aguas naturales, es la responsable de que muchos metales se disuelvan solamente en cantidades de trazas. La formación de hidróxidos de algún metal y su estabilización en función del pH se muestra la figura 3.4.



Equilibrio del agua



Combinando las ecuaciones (1) y (2),

$$\text{Log}[M^{y+}] + y \cdot \text{pH} + y \cdot \text{Log}K_w = \text{Log}K_s$$

$$\text{Log}[M^{y+}] = (\text{Log}K_s - y \cdot \text{Log}K_w) - y \cdot \text{pH} \tag{3}$$

$$\text{Log}[M^{y+}] = \text{Constante} - y \cdot \text{pH}$$

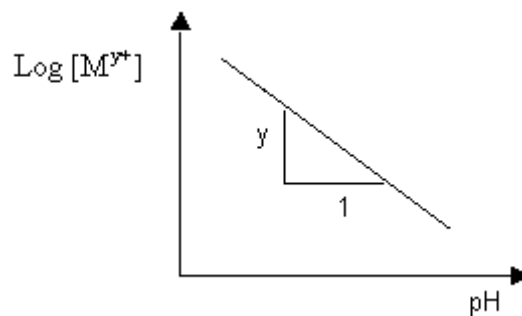


Figura 3.4: La solubilidad de los hidróxidos de metales viene determinada por el equilibrio del hidróxido de metal con el agua (Galdames, 2000).

Pueden haber hidróxidos donde presenten dos ramas de ionizado, aunque en la figura 3.4 solo se produce una rama de ionización. Para realizar las posibles medidas de las sustancias inorgánicas presentes en el agua se basan en su totalidad en las técnicas estandarizadas y detalladas que se encuentran en el manual APHA-AWWA-WPCF (1992).

b) Sustancia inorgánica particulada

Existen diferentes fuentes de materia inorgánica particulada de diferentes índoles, como por ejemplo el polvo atmosférico removido por lluvias, contacto con la tierra, etc., las cuales se dan en la figura 3.5.

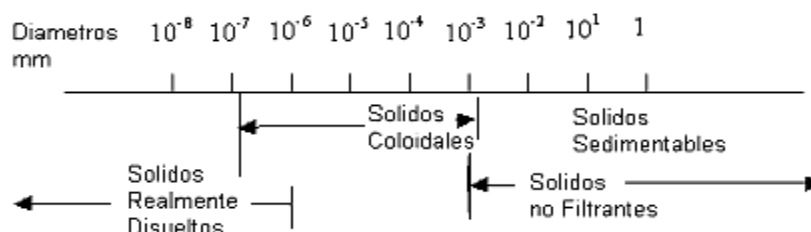


Figura 3.5: Medida y clasificación de los sustancias inorgánicas en suspensiones en el agua.

La calidad química de las aguas superficiales con respecto a sus concentraciones de materia inorgánica particulada varía tremendamente con el tiempo. Por ejemplo después de una tormenta se eleva la concentración de arena, pero en cambio en verano hay poca arena en suspensión pero gran cantidad de algas y organismos acuáticos.

La materia particulada genera una serie de efectos adversos y de adsorción sobre el medio que la contiene. Los efectos adversos de la materia particulada sobre el agua que parece sucia provocando repulsión y también provoca la reducción de la penetración de la luz, disminuyendo la actividad algal. A esta materia particulada en suspensión también se adsorbe y se concentra una gran variedad de contaminantes en su superficie, como son el Plomo emitido por automóviles, bacterias y virus dando problemas en la desinfección del agua y metales pesados tóxicos.

c) Fuentes de gases inorgánicos

El efecto de la precipitación atmosférica genera la disolución de los gases de diferentes tipos presentes en la naturaleza. Los tipos de gases que se disuelven son: Nitrógeno, Oxígeno, Dióxido de carbono y Dióxido de Azufre.

Para realizar el cálculo de la concentración de un gas en un líquido a partir de la presión parcial del gas, cuando el líquido y el gas están en equilibrio, se utiliza la Ley de Henry (Ley de Acción de Masas). En la tabla 3.5 se dan los valores de la constante de Henry para diferentes gases en condiciones normales y los valores de la concentración de saturación de los mismos gases para condiciones normales se dan en la tabla 3.6.

$$[CO_2] = K_H \cdot P_{CO_2} \quad (4)$$

Donde,

$$[CO_2] = \text{Concentración de saturación del } CO_2 \text{ en el líquido } \frac{\text{moles}}{L}$$

$$K_H = \text{Constante de Henry, } \frac{\text{moles}}{L \cdot \text{Atm}}$$

$$P_{CO_2} = \text{Presión parcial del } CO_2 \text{ (atm)}$$

Tabla 3.5: Valores de la Constante de la ley de Henry según el gas en condiciones normales (Galdames, 2000).

Gas	$K_H \left[\frac{\text{moles}}{L \cdot \text{atm}} \right]$
N ₂	10 ^{-3.2}
O ₂	10 ^{-2.9}
CO ₂	10 ^{-1.5}
SO ₂	10 ^{1.13}

Tabla 3.6: Valores de la concentración de saturación de gases en condiciones normales (Galdames, 2000).

Gas	P_{gas} (atm)	$K_H \left[\frac{\text{moles}}{L - \text{atm}} \right]$	$[\text{Gas}] \left[\frac{\text{moles}}{L} \right]$	$\text{Gas} \left[\frac{\text{Mg}}{L} \right]$
N ₂	0.7808	$10^{-3.2}$	$4.9 \cdot 10^{-4}$	13.8
O ₂	0.2	$10^{-2.9}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	8.4
CO ₂ (promedio mundial)	$3.25 \cdot 10^{-4}$	$10^{-1.5}$	10^{-5}	0.45
CO ₂ (algunas zonas urbanas)	0.001	$10^{-1.5}$	$3.2 \cdot 10^{-5}$	1.4
SO ₂ (rural)	$7 \cdot 10^{-9}$	$10^{1.13}$	$9.4 \cdot 10^{-8}$	0.006
SO ₂ (urbano)	10^{-6}	$10^{1.13}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	0.86

Por ejemplo para la formación de ácido carbónico:

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (ácido débil), con un pH de lluvia en presencia de $[\text{CO}_2] \approx 5,6$ (Mg/L).

Y en la del ácido sulfuroso:

- $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ (ácido fuerte), con un pH de lluvia en atmósfera altamente contaminadas, siendo aproximadamente 3, generándose una precipitación comúnmente conocida como lluvia ácida.

Por lo que respecta a la concentración de oxígeno disuelto en las aguas superficiales, normalmente, está limitada debido a los procesos bioquímicos que alberga y en el mejor de los casos, el agua puede estar en equilibrio con la atmósfera, ya que está saturada en oxígeno como se ha mostrado en la tabla 3.6. La concentración en oxígeno varía en función con la temperatura, véase tabla 3.7.

Tabla 3.7: Concentración de saturación de oxígeno en (mg/l) según la temperatura.

Temperatura °C	Concentración de saturación (mgO ₂ / L)
0	14.7
10	11.3
20	9.0
30	7.4
40	6.6

Dado que la concentración de saturación del oxígeno es pequeña (<10 mg/L) no se requiere de una gran concentración de sustancias orgánicas para agotarlo completamente.

Afortunadamente, existen ciertos mecanismos que suministran oxígeno al agua, como es el caso de la reaireación. Este fenómeno ocurre cuando el contenido de oxígeno disuelto del agua es menor que la concentración de saturación produciéndose un déficit de oxígeno (Δ) y entonces en este caso, el oxígeno atmosférico tiende a ingresar al agua para restaurar el equilibrio. Para la evaluación del estado de oxigenación del agua se han establecido un conjunto de parámetros, que dependen de la morfología del cauce, y son el déficit de oxígeno disuelto y la tasa o velocidad de reaireación, que se muestran en la

figura 3.6. Estos dos parámetros nos ayudan a determinar la cantidad de oxígeno presente en el agua y el que sería necesario para volver a establecer el equilibrio de oxígeno.

- Déficit de oxígeno disuelto (Δ) = Concentración de saturación - concentración real de oxígeno disuelto.
- Tasa o velocidad de reaeración = Función del grado de turbulencia y déficit de oxígeno disuelto.

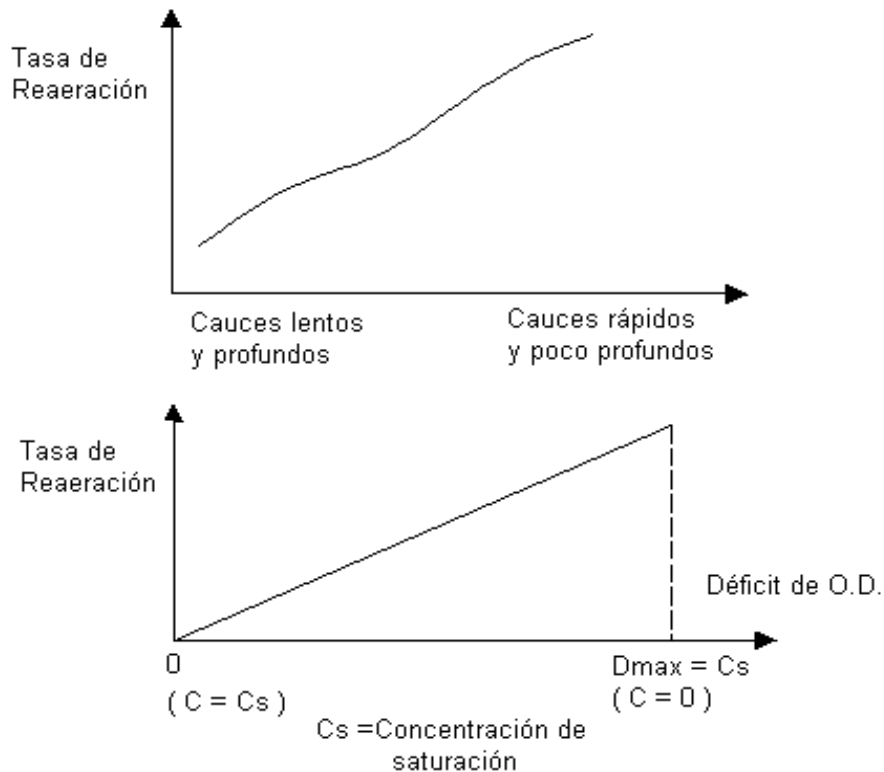


Figura 3.6: Variación de la tasa de re-aireación según el tipo de cauce y la relación que existe con el déficit de oxígeno disuelto.

Es fundamental que el oxígeno disuelto no sea totalmente consumido por las sustancias orgánicas descargadas a un río, ya que casi todas las formas superiores de vida acuática requieren oxígeno para sobrevivir, como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Nivel mínimo de Oxígeno Disuelto, en mg/l, para diferentes tipos de especies acuáticas.

Especie	Nivel mínimo de OD, Mg/L
Truchas, Salmones	4 – 5
Carpas	2
Lombrices de barro	0.5

Es importante resaltar la importancia del contenido en oxígeno de las aguas superficiales, ya que si el contenido de oxígeno cae a cero y el curso se transforma en anaeróbico, mueren todas las formas acuáticas superiores y se desarrollan solamente las bacterias anaeróbicas.

3.3 CALIDAD BIOLÓGICA DEL AGUA

El agua es un medio propicio para la vida, ya que para el desarrollo de los metabolismos biológicos siempre es necesario la presencia de agua, lo cual implica que la calidad biológica del agua está determinada por los organismos residentes en ella. Por tanto es necesario entender la relación que existe entre la biología presente en el agua y la calidad de esta. También se busca conocer levemente los procesos metabólicos que provocan transferencia energética y la relación existente con las reacciones acopladas de transferencia de electrones, es decir, reacciones de oxidación y reducción.

3.3.1 Sustancias orgánicas

La presencia de sustancias orgánicas en el agua determina el comportamiento bioquímico de todo el medio acuoso. Debido a esto, el análisis de las sustancias orgánicas presentes, su tipología y su comportamiento es un buen camino para llegar a entender que ocurre y como suceden las reacciones metabólicas en aguas superficiales.

Fuentes de sustancias orgánicas en el agua

Las fuentes de materia orgánica pueden ser de origen natural o por intervención antrópica.

La contaminación orgánica natural se produce debida a escurrimientos que han estado en contacto con vegetación decayente, con excrementos de animales o con desechos de la vida acuática. Por el contrario, la contaminación por actividad antrópica se produce por el desarrollo de la industria y principalmente por la acumulación en altas concentraciones de productos y subproductos del metabolismo humano y animal (tabla 3.9).

Tabla 3.9: Contaminación de sustancias orgánicas debida al hombre.

Fuente o actividad	Contaminante orgánico
Desechos humanos y animal	Excremento, urea
Desechos alimenticios	Azucars, almidones, alcoholes, grasas, aceites, etc.
Basura	Papel, cáscaras, hojas de té, café molido.
Misceláneos	Jabones, detergentes, champú
Agricultura	Pesticidas
Actividades industriales	Son los más importantes y más variados
Farmacéutica y petrolífera	Gama enorme de diferentes contaminantes, cada uno en una concentración pequeña
Otras industrias	Produce generalmente concentraciones

	muy elevadas de un único tipo de contaminantes
a. Procesadora de papel	Celulosa
b. Faenadota de aves	Sangre
c. Manufacturas de alimentos	Azúcares

Energía y termodinámica

En este punto se pretende explicar los conceptos de energía en términos bioquímicos, los cuales dependen claramente de la termodinámica.

La energía es la capacidad de realizar un trabajo en el caso que se consuma, pero también existen procesos para capturarla y almacenarla. Aunque existen varias formas de energía como pueden ser: química, luminosa, mecánica, calórica, eléctrica,.... Pero solo hay dos tipos básicos en la que se engloban todas las formas posibles de energía y que son:

- **Potencial:** es la capacidad de realizar trabajo como resultado de su estado o posición. Puede estar en los enlaces químicos, en un gradiente de concentración, en un potencial eléctrico, etc.
- **Cinética:** es la energía del movimiento, puede existir en forma de calor, luz, etc.

En términos bioquímicos representa la capacidad de cambio, ya que la vida depende de que la energía pueda ser transformada de una forma a otra, cuyo estudio es la base de la termodinámica. Sus leyes son aplicables a los sistemas cerrados o aislados, es decir aquellos que no intercambian energía con el medio que los rodea; las células son sistemas abiertos, es decir, pequeñas partes de un sistema cerrado mayor. Las leyes de la termodinámica expresan:

- **1º Ley de la Termodinámica:** En un sistema aislado la energía no se crea ni se destruye, solo puede ser transformada de una forma en otra.
- **2º Ley de la Termodinámica:** No toda la energía puede ser usada y el desorden tiende a aumentar, lo que se conoce como entropía.

Metabolismo celular

Para entender los mecanismos bioquímicos que suceden en el seno de un río con carga biológica hay que intentar visualizar que cada célula desarrolla miles de reacciones químicas. Estas reacciones químicas pueden ser exergónicas (con liberación de energía) o endergónicas (con consumo de energía) y que en su conjunto constituyen el metabolismo celular.

Si las reacciones químicas dentro de una célula están regidas por las mismas leyes termodinámicas que suceden en cualquier otro medio cerrado o aislado, entonces existen varias vías metabólicas que desarrollan la transferencia de energía como son:

- 1) Las células asocian las reacciones. Las reacciones endergónicas se llevan a cabo con la energía liberada por las reacciones exergónicas.
- 2) Las células sintetizan moléculas portadoras de energía que son capaces de capturar la energía de las reacciones exergónicas y las llevan a las reacciones endergónicas.
- 3) Las células regulan las reacciones químicas por medio de catalizadores biológicos que se dominan enzimas.

Las células acostumbran a guardar la energía necesaria para sus reacciones en ciertas moléculas, siendo el ATP, trifosfato de adenosina, la principal molécula para guardar energía. Las células usan el ATP para capturar, transferir y almacenar energía libre necesaria para realizar el trabajo químico, es decir, funciona como una moneda de intercambio energético. Como concepto general, la función del ATP es suministrar energía hidrolizándose a ADP, adenosín difosfato y Pi, fósforo inorgánico. Esta energía puede usarse para diferentes funciones como son:

- Obtener energía química: para la síntesis de macromoléculas.
- Transporte a través de las membranas
- Trabajo mecánico: contracción muscular, movimiento de cilios y flagelos, movimiento de los cromosomas,....

Tradicionalmente se ha separado el metabolismo celular en anabolismo y catabolismo, según las necesidades energéticas de las células o las necesidades de síntesis de determinadas moléculas.

Por tanto vale la pena destacar que la actividad vital se manifiesta a través del metabolismo y donde las reacciones son de dos tipos,

- 1) Reacciones anabólicas: Son reacciones en la que se forman compuestos complejos a partir de compuestos sencillos (figura 3.7) consumiendo energía, es decir, son endergónicas. Por ejemplo: $A+B=AB$.

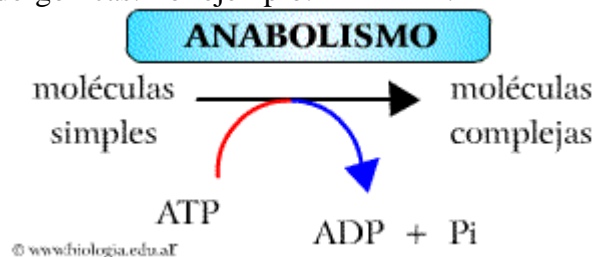


Figura 3.7: Estructura de las reacciones anabólicas.

- 2) Reacciones catabólicas: Son reacciones en las que compuestos complejos se transforman en otros más sencillos. Son generalmente exergónicas, es decir,

liberan energía, véase figura 3.8, esta energía es la usada, normalmente, en las reacciones anabólicas. Por ejemplo: $AB=A+B$.

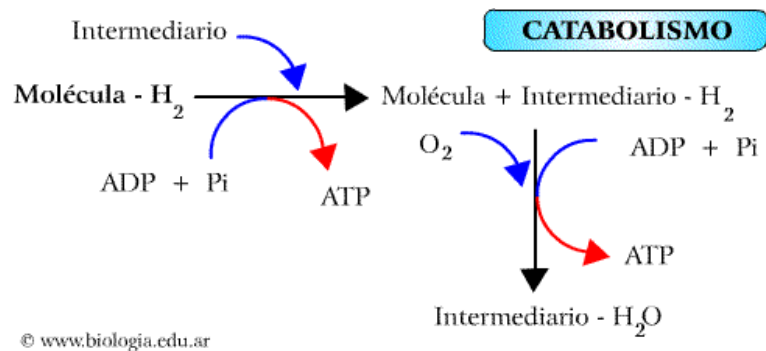


Figura 3.8: Estructuran de las reacciones catabólicas.

Como el ATP es usado como donante de energía en muchas reacciones anabólicas (de síntesis) acoplándose a las mismas de tal manera que el ΔG sea negativo y la reacción se produzca espontáneamente.

La hidrólisis del ATP da:

- 1) $ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i$; $G_o' = -7,3 \text{ Kcal/mol}$ \rightarrow muy exergónica (la G de una célula viva está en -12 Kcal/mol).

Y la hidrólisis del adenosín difosfato (ADP) da:

- 2) $ADP + H_2O \rightarrow AMP + P_i$; $G_o' = -7,2 \text{ Kcal/mol}$ \rightarrow muy exergónica.

Entonces para obtener ATP (adenosín-trifosfato) a partir de ADP (adenosín-difosfato) se debe suministrar por lo menos una energía superior a $7,3 \text{ Kcal}$. Las reacciones que, típicamente suministran dicha energía son las reacciones de oxidación, como la reacción: $ADP + P_i + \text{energía libre} \rightarrow ATP + H_2O$

Cuando los grupos fosfatos se transfieren al ADP para formar ATP se almacena energía, aunque otra forma de transferir energía es a partir de la transferencia de electrones (e^-) y son las reacciones que se denominan de oxidorreducción o reacciones redox.

- La ganancia de uno o más e^- por un átomo, ión o molécula \rightarrow REDUCCIÓN
- La pérdida de uno o más e^- por un átomo, ión o molécula \rightarrow OXIDACIÓN

Hay que tener en cuenta que una molécula se oxida o se reduce no solamente cuando intercambia e^- , sino también cuando intercambia átomos de Hidrógeno (no iones H), ya que involucra transferencia de electrones: $H = H^+ + e^-$. Por ello una oxidación siempre ocurre simultáneamente con una reducción. Cuando un material se oxida, los e^- perdidos se transfieren a otro material, reduciéndolo. Parte de la energía presente en el agente reductor (cuando da e^-), se asocia con el producto reducido, por lo que las reacciones redox son otra forma de transferencia de energía.

Durante las principales reacciones redox del catabolismo de la materia orgánica intervienen dos moléculas intermediarias: NAD y FAD. Estas moléculas se denominan cofactores Redox, donde alternativamente se reducen y luego se oxidan.

- **NAD:** Nicotinamida Adenina Dinucleótido. NAD^+ en su forma oxidada y $\text{NADH} + \text{H}^+$ cuando está reducido. La concentración de NAD^+ en la célula es pequeña, por lo tanto debe reciclarse continuamente de la forma oxidada a la reducida y viceversa.



- **FAD:** Flavina Adenina Dinucleótido. Transporta 2H, por lo que es FAD en su forma oxidada y FADH_2 cuando está reducido.

Todos estos procesos de transferencia de energía conforman los metabolismos, la existencia de diferentes tipos de metabolismos se produce por los diversos procesos de obtención de carbono y de obtención de energía:

- 1) **Metabolismo autótrofo fotosintético:** La fuente de carbono procede del anhídrido carbónico (CO_2) y mediante la energía de la luz solar se genera una serie de reacciones metabólicas de crecimiento, respiración y muerte para los organismos autótrofos.
- 2) **Metabolismo autótrofo quimiolitotrófico:** La fuente de carbono también procede del CO_2 pero la energía procede de reacciones químicas exotérmicas inorgánicas como son la nitrificación donde se oxida compuestos de nitrógeno como pueden ser el nitrito y el nitrato.
- 3) **Metabolismo heterótrofo:** La fuente de carbono procede de moléculas de materia orgánica y la energía procede de la oxidación de estas moléculas orgánicas absorbidas a través de la membrana plasmática.

Destacar que aunque existan diferencias entre los metabolismos los autótrofos y los heterótrofos se necesitan mutuamente para poder existir. En los procesos de obtención de energía a partir de la materia orgánica existen dos mecanismos:

- **Respiración celular:** ocurre cuando el ambiente es aerobio (contiene O_2) y el piruvato se transforma en dióxido de Carbono (CO_2) liberando la energía almacenada en los enlaces piruvato y atrapándola en el ATP.
- **Fermentación:** cuando el O_2 está ausente, ambiente anaerobio, en lugar de producir CO_2 se producen otras moléculas como el ác. láctico o el etanol.

Para las bacterias se deben tener otras consideraciones en cuenta para su existencia, ya que, por ejemplo la mayoría de las bacterias prefieren un pH neutro (7,0), aunque algunas bacterias son capaces de formar esporas bajo condiciones ambientales adversas. Estas esporas son altamente resistentes a condiciones desfavorables, pudiendo permanecer en estado latente por mucho tiempo, hasta que las condiciones vuelvan a ser óptimas.

Efectos de las sustancias orgánicas

Existen diferentes tipos de efectos de las sustancias orgánicas sobre el medio y sobre otros organismos. Estos efectos dependen del tipo de sustancia orgánica que este actuando, pudiendo ser:

1. Algunas sustancias orgánicas son tóxicas para los seres humanos y organismos acuáticos, como son los pesticidas.
2. Otras producen olores, sabores, colores y espumas.
3. La mayoría hace disminuir el nivel de oxígeno disuelto, es decir, son biodegradables.

En la naturaleza se encuentran diferentes clases de sustancias orgánicas tóxicas, normalmente son introducidas por el hombre. Estas sustancias son pesticidas, otras sustancias orgánicas y sustancias orgánicas biodegradables, siendo estas últimas las más importantes en el ciclo biológico ya que son utilizadas como fuentes de carbono por los organismos acuáticos presentes en el medio.

Las sustancias orgánicas tóxicas se clasifican y se describen,

1. Pesticidas:

Las fuentes de abastecimiento de este tipo de sustancias orgánicas tóxicas son debido a la aplicación directa a las aguas superficiales para combatir plagas o plagas, y se produce por la descarga de aguas servidas o residuos industriales y por escurrimientos en aguas de lluvia o por el regadío de pesticidas adsorbidos por los suelos.

La ruta de los pesticidas que han sido aplicados al suelo, dado que son prácticamente insolubles en agua, se obtiene una cantidad muy pequeña de pesticidas que es arrastrada por las aguas de lluvias hacia aguas subterráneas o superficiales, pero el suelo erosionado arrastra consigo el pesticida depositado en él, pudiendo alcanzar un río o lago.

Los pesticidas sufren acumulación biológica, es decir, bioacumulación, ya que como son insolubles en agua, se concentran en los tejidos grasos de los organismos. Debido a su toxicidad y a la magnificación biológica, se ha prohibido el uso (en la mayoría de países desarrollados) de ciertos pesticidas orgánicos clorados, tales como el DDT y el DDD.

Este tipo de sustancias puede generar una serie de efectos sobre los demás organismos de manera inmediata y a largo plazo, llamándose cáncer.

2. Otras sustancias orgánicas:

Las sustancias orgánicas no tóxicas que deterioran la calidad estética del agua son:

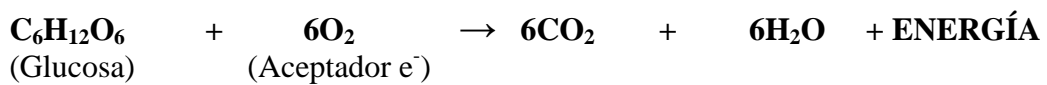
- Alquil - Vencen - Sulfonato (ABS, Detergentes) que son sustancias no tóxicas, pero producen una gruesa capa de espuma no biodegradable y que perdura largo tiempo.
- Las sustancias orgánicas causantes de color, sabor y olor, debido a que los sentidos del gusto y del olfato son extremadamente sensibles, bastan solamente pequeñas concentraciones de compuestos orgánicos aromáticos para producir el desagrado sobre estas aguas. Por ejemplo:

- Fenol: Gusto a remedio.
- Muchas algas: Gusto barroso o terroso.
- Alga Synura: Olor a pepino.
- Alga Anabaena: Olor a carnicería.

3. Sustancias orgánicas biodegradables

Estos compuestos son fuentes de carbono para las bacterias Quimorganotróficas y para algunos microorganismos superiores (protozoos).

La reacción de oxidación aeróbica de la glucosa, donde se obtiene energía, se describe como:



Y la reacción de formación de tejido celular se describe como:

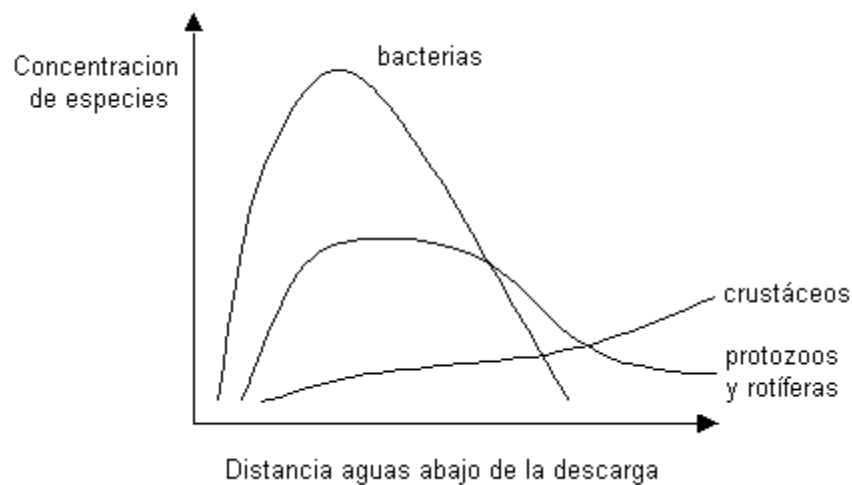
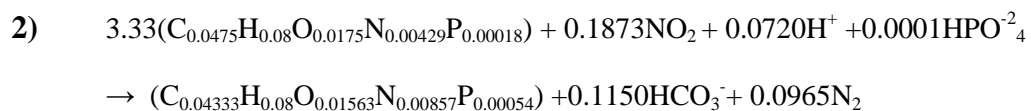
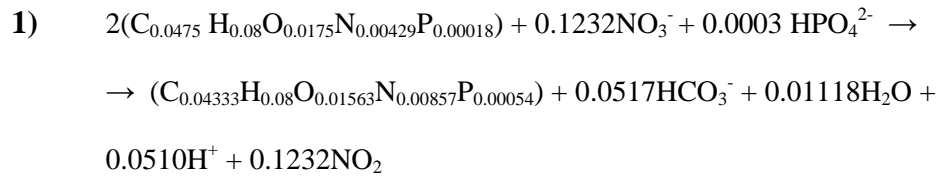


Figura 3.9: Sucesión de especies después de una descarga orgánica.

Como se muestra en la figura 3.9, se puede observar que las bacterias utilizan como alimento el material orgánico descargado en el medio acuoso y los protozoos y rotíferas se alimentan de bacterias muertas, oxidando parte del material celular bacteriano para obtener requerimientos energéticos. Y los crustáceos se alimentan de protozoos y rotíferas por eso la población de crustáceos empieza a aumentar con el máximo de población de protozoos y rotíferas. En cada sucesión de especies, la materia orgánica se oxida a CO_2 y H_2O para producir energía y por lo tanto, el tamaño de la población de las especies siguientes disminuye debido a que queda menos materia orgánica con la que alimentarse.

Existen también los metabolismos anaeróbicos que degradan sustancias biodegradables, los cuales producen un tipo de oxidación y con ella una serie de

productos y subproductos que son típicos de este tipo de ambientes tan reductores. Las oxidaciones bacterianas anaeróbicas de la materia orgánica ($C_{0.0475}H_{0.08}O_{0.0175}N_{0.00429}P_{0.00018}$) debido a las sustancias inorgánicas iónicas nitrogenadas, como son el nitrato y el nitrito, obteniéndose material celular bacteriano ($C_{0.04333}H_{0.08}O_{0.01563}N_{0.00857}P_{0.00054}$).



Algunos productos finales de la oxidación anaeróbica son:

- Energía liberada al medio, que los organismos consumen para su metabolismo.
- CO_2 (ya que está en equilibrio con HCO_3^-)
- Nitrógeno
- Bacterias anaeróbicas

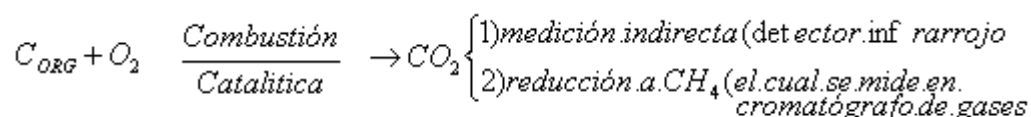
Es probable que en la respiración anaeróbica se produzcan sulfatos y sulfuros formándose sulfuros metálicos insolubles pesados, que son los que dan una tonalidad de color negro al suelo. También se puede escapar a la atmósfera el ácido sulfhídrico generado por la oxidación anaeróbica y provoca un olor a huevo podrido tan característico.

Medida de las sustancias orgánicas en el agua

Para la determinación de compuestos orgánicos existen métodos analíticos específicos para cada tipo de sustancia orgánica. Los métodos más usados para establecer la cantidad total de sustancias orgánicas presentes en el agua son el Carbono Orgánico Total (COT), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

1) *Carbono Orgánico Total (COT):*

La toma de medidas se realiza,



Una vez calibrado el instrumento, el COT se puede determinar en pocos minutos.

- Desventajas: El COT no proporciona ninguna información respecto del estado de oxidación o del grado de biodegradabilidad de la materia orgánica, es decir, muestras con idéntico COT pueden ejercer un muy diferente efecto.
- Interpretación: El COT es una medida del contenido de carbono y no de la demanda de oxígeno del material orgánico.

2) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es una medida de mayor utilidad que el COT, ya que es una medida indirecta de la concentración de material orgánico en función de la cantidad de oxígeno requerido para oxidarlo completamente en forma química. La medición se realiza a partir de la oxidación de materia orgánica presente en el agua como se muestra en la figura 3.10.

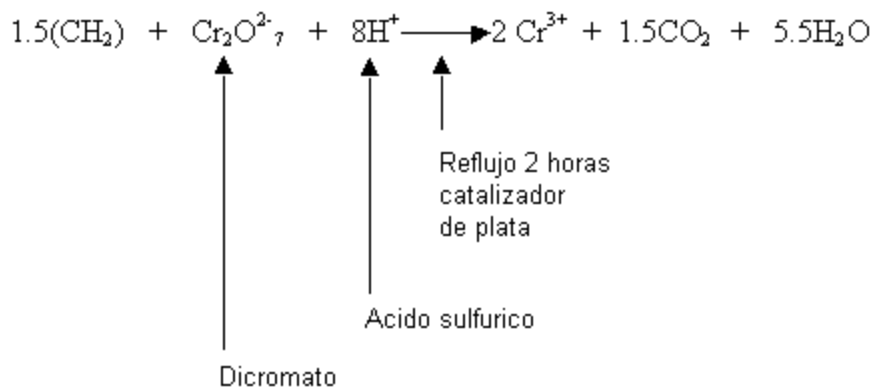


Figura 3.10: Reacción de oxidación de materia orgánica para obtener la medida del DQO.

- Desventajas: En general, en una muestra hay compuestos orgánicos que, aunque son oxidados por el dicromato de potasio, no son biodegradables y, por lo tanto, no son oxidados al ser descargados en un río, normalmente la DQO sobreestima la cantidad de oxígeno que se utilizaría en un río.

La DQO, no entrega ninguna información acerca de la tasa en que va a ocurrir la oxidación bioquímica en el curso del receptor.

3) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Este método simula el proceso bioquímico que ocurre en el curso de agua.

Otro avance de este sistema es que entrega resultados tanto en la cantidad de material biodegradable como en su tasa de oxidación.

La medición se realiza, normalmente durante 5 días y según se describe en la figura 3.11.

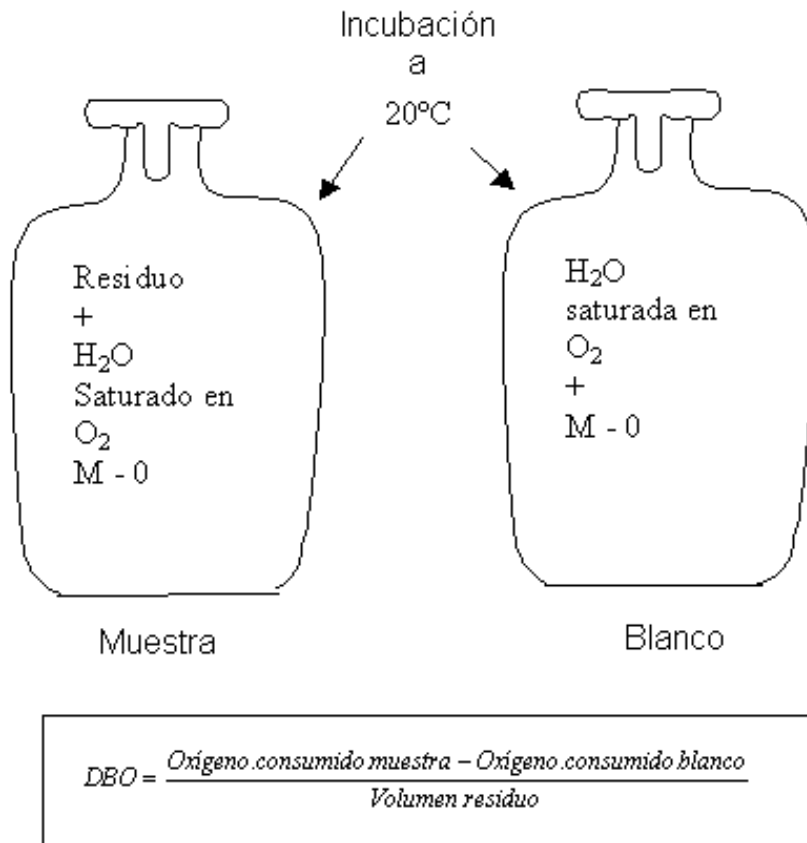


Figura 3.11: Medición de la DBO.

La descripción matemática de la degradación se interpreta con la oxidación bioquímica de la materia orgánica, la cual sigue una ley cinética de primer orden (6). A partir de esta se obtiene la tasa de oxidación de la materia orgánica siendo proporcional a la cantidad de materia orgánica que aun queda por oxidar,

$$\frac{\Delta c}{dT} = -Kc \quad (6)$$

Donde,

- c = Concentración de sustancia orgánica presente
- K = Constante de velocidad
- T = Tiempo

Existen una serie de consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de utilizar este método para analizar el estado del agua superficial.

- La cantidad de oxígeno utilizada en cualquier instante (DBO ejecutada) es una medida de la materia orgánica que ha sido oxidada ($c_0 - c$).
- La cantidad de oxígeno aun necesaria (DBO no ejecutada L_T) es una medida del material orgánico presente (c).

Luego se puede escribir:

$$\frac{DL_T}{dT} = -K_1 \cdot L_T$$

$$\int_{L_0}^{L_T} \frac{dL_T}{L_T} = \int_0^T -K_1 \cdot dT$$

$$Ln \left[\frac{L_T}{L_0} \right] = -K_1 \cdot T \quad (7)$$

$$L_T = L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot T}$$

Por tanto la relación DBO – DQO se puede interpretar como:

- DBO/DQO alta: Gran proporción de material biodegradable (O₂ disponible).
- DBO/DQO baja: Pequeña proporción de material biodegradable (poco O₂).

3.3.2 Microorganismos

Este apartado se explica las diferentes especies que habitan en el medio acuoso superficial donde se presentan sus propiedades físicas y el metabolismo actuante para cada microorganismo.

Consideraciones diversas

Los microorganismos son especies vivientes de tamaños diminutos, los cuales no se consideran como plantas ni como animales, sino que más bien se los califica en un tercer reino llamado Protista.

Los microorganismos se consideran que tiene un tamaño promedio de $10^{-6} \text{m} = 1 \mu\text{m}$, que se muestran en la tabla 3.10, y con un peso promedio $< 10^{-12} \text{g}$. Estos organismos varían en forma y en la habilidad para usar diferentes sustancias como fuentes de alimentos y métodos de reproducción. Por tanto se han establecido clasificaciones para agrupar estos microorganismos según el tamaño, la constitución celular y por la fuente de alimentación.

Tabla 3.10: Clasificación de los microorganismos por tamaños.

Microorganismos	Tamaño
Bacterias	1 μm
Algas	1 μm – varios metros
Protozoos	10 – 100 μm
Virus	0,01 – 0,30 μm

La clasificación por su constitución se obtiene la existencia de dos tipos de microorganismos como:

- a) Eucarióticas: Poseen un núcleo verdadero (una estructura envuelta en una membrana que contiene un material hereditario).
- b) Procarióticas: Carecen de un núcleo verdadero o bien definido.

Y por la fuente de alimentación, donde se diferencia entre heterótrofos y autótrofos, ya explicados en el apartado 3.3.1.

A continuación se describen los microorganismos que se clasifican en la tabla 3.10 y las clases que existen dentro de cada tipo.

Bacterias

Son microorganismos procarióticos, los cuales se pueden realizar diferentes clasificaciones como son su forma y a los componentes celulares de las bacterias.

La clasificación de estos microorganismos se puede establecer según su forma, véase tabla 3.11.

Tabla 3.11: Clasificación de bacterias según su forma

Tipo de bacteria	Forma
Cocos	Esférica
Bacilos	Cilíndrica
Espirilos	De espiral

Respecto a los componentes celulares de las bacterias se diferencian principalmente por su movilidad como se muestra en la tabla 3.12.

Tabla 3.12: Clasificación según los componentes de movilidad y su descripción

Tipos de componentes	Descripción
Componentes fijos	Membrana celular, Ribosomas y región nuclear
Componentes variables	Flagelos (apéndices como cabellos que permiten el desplazamiento)

Por lo que hace a sus fuentes de energía, fuentes de carbono y sus necesidades de oxígeno la clasificación se realiza como se ha explicado en la sección de metabolismo celular del apartado 3.3.1 de este capítulo.

Algas

Las algas son los microorganismos eucarióticos más simples que contienen clorofila. El hábitat más común son las aguas expuestas al sol ya que son organismos fotolitotróficos que utilizan la energía radiante del sol.

Los principales factores requeridos para el crecimiento de algas son la luz solar y los nutrientes, principalmente sustancias formadas por nitrógeno y fósforo. Por tanto las

algas pueden considerarse como el comienzo de la cadena alimenticia acuática, ya que no requieren de otros organismos vivos para obtener alimentos o energía, sino que se alimentan de sustancias nitrogenadas como son el amonio (NH_4^+) o el nitrato (NO_3^-).

Se puede establecer una clasificación de acuerdo a su color, pudiéndose dividir en Verdes, Cafés y Rojas.

También es importante resaltar algunos efectos de las algas, ya que producen compuestos de olor y sabor desagradable, provocando la disminución del potencial del agua como fuente de abastecimiento de agua potable. También consecuentemente influyen el nivel de oxígeno disuelto, ya que su presencia tiene dos periodos. Se divide en periodos diurnos y nocturnos, ya que genera una variación importante en el oxígeno disuelto. Durante el periodo diurno las algas aportan oxígeno al medio mediante la clorofila, que es el crecimiento de su material celular y durante el periodo nocturno respiran, consumiendo el oxígeno disuelto en el agua.

Protozoos

Los protozoos son microorganismos eucarióticos con características similares a la de los animales, pudiendo ser unicelular o multicelulares. Siendo estos catalogados como consumidores de las bacterias, algas y materia orgánica particulada.

El hábitat más común de estos microorganismos son los océanos, lagos, ríos, lagunas, los 10 primeros centímetros del suelo y los intestinos de los animales. Los ejemplos más comunes son las amebas y los paramecios.

Virus

Los virus son sumamente pequeños, contienen una porción de material genético (ácido nucleico) protegido por una envoltura. En casos simples están constituidos por una sola proteína y en los casos complejos están rodeados por una envoltura adicional constituida por una lipoproteína y en los casos aun más complejos tienen enzimas asociadas a ellos. Generalmente, mientras más complejo es el virus, más fácil resulta inactivarlo.

Todos los virus son parásitos que se reproducen invadiendo células huéspedes y obligando a estas a producir más virus. Estos mecanismos no son los que pretende dar a conocer este estudio, ya que sus procesos no se tienen aún bien descritos bioquímicamente, pero que una vez se tengan descritos sus metabolismos se pueden introducir fácilmente en la base bioquímica del modelo.

3.3.3 Contaminación

En general, los productos químicos tóxicos peligrosos por producir una cierta o total contaminación en aguas superficiales, se dividen en diferentes tipos de los cuales se han desconocido, en muchas ocasiones, como actúan cuando son descargados en el agua.

Estos productos tóxicos son:

- Los productos sintéticos de la industria química; pesticidas, herbicidas, insecticidas, etc.
- Los bifenilos policlorados (BPC).

La fuente más probable para dar como resultado aguas contaminadas con bacterias, causantes de enfermedades, son las que provienen de la materia fecal.

Destacar que los contaminantes orgánicos son diferentes a los contaminantes químicos porque no son tóxicos en si mismos.

3.3.4 Eutrofización

La eutrofización son una conjunto de procesos y reacciones en el que se puede observar un crecimiento excesivo y molesto de algas en lagos, lagunas, tanques, etc.

Los problemas que se resultan de la eutrofización en un medio hídrico superficial son:

- Empeoramiento del uso recreacional del agua.
- Problemas para usar dicha agua como fuente de abastecimiento de agua potable.
- La competencia por el consumo del oxígeno disuelto provoca la muerte masiva de los organismos acuáticos superiores (peces).
- Perdida gradual de actividades como la pesca y los deportes acuáticos.

Las fuentes que pueden provocar la eutrofización son debidas a los efluentes líquidos de tierra agrícolas y/o urbanas y los residuos domésticos e industriales ricos en nutrientes (nitrógeno y fósforo). Hay que destacar que la propia materia orgánica también contribuye en este proceso.

No existen métodos en que eliminen este proceso pero si que hay un cierto conocimiento de él y por tanto se pueden aplicar una serie de tratamientos contra la eutrofización. Como primera medida de análisis para evaluar la posible eutrofización del medio es el control de la erosión en la agricultura, debido a su alta carga en nutrientes y pesticidas, muy habitualmente utilizados.

3.4 Legislación

El Plan de Saneamiento de Cataluña, aprobado por el Gobierno de la Generalitat en fecha 7 de noviembre de 1995, establece una serie de objetivos de calidad para las aguas superficiales continentales de Cataluña, definidos a partir de sus posibles usos. Para llegar a conseguir estos objetivos se ha elaborado, entre otros, el Programa de Saneamiento de Aguas Residuales Urbanas (PSARU), aprobado el 3 de mayo de 2002,

que define todas las actuaciones destinadas a la reducción de la contaminación originada por el uso doméstico del agua.

La Directiva Marco de Agua (2000/60/CE), aprobada por el Parlamento Europeo y el Consejo a finales del 2000, con el objetivo final que es conseguir que todas las masas de agua (excepto las fuertemente modificadas y las artificiales) alcancen al buen estado (ecológico y químico), como fecha límite a finales del 2015. Este buen estado ecológico se define como “una expresión de la calidad de la estructura y del funcionamiento de los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas superficiales”.

De esta manera se promueve la explotación y el uso de los recursos, y de los espacios hídricos, de manera responsable, racional y sostenible, favoreciendo la implantación de sistemas naturales, y de otros, como medio para mejorar la calidad del agua que se vierte al medio.