

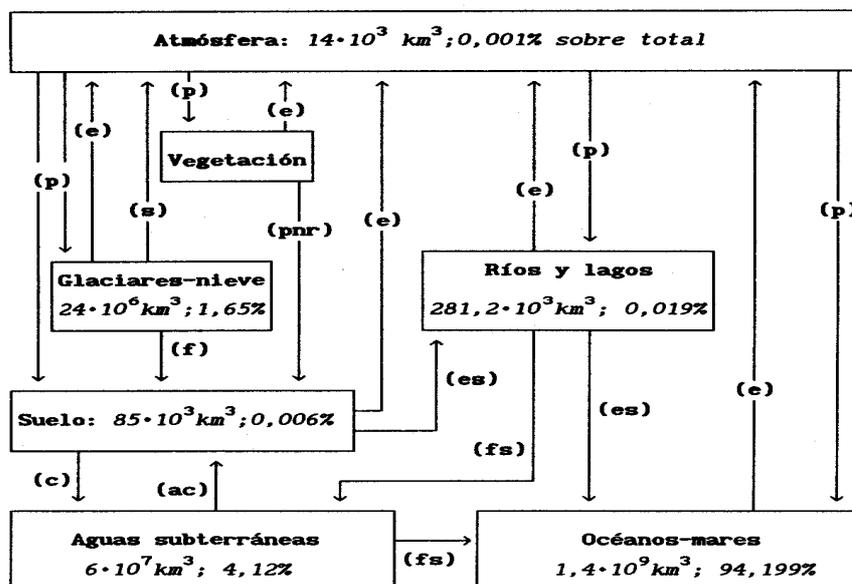
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS

Prof. Dr. Rafael Marín Galvín

Jefe de Control de Calidad, Calidad y Medio Ambiente
Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A. (EMACSA)
C/De los Plateros, 1; 14006-Córdoba. E-mail: rmargal@emacsa.es

1.-Introducción

El agua se encuentra en nuestro planeta en forma líquida, sólida y gaseosa. El total de agua en la Tierra se estima en unos 1.400 millones de km^3 , de los cuáles un 3% del total corresponde a agua *dulce*. La provisión global de agua en la Tierra (invariable desde hace miles de millones de años) está sometida al denominado "Ciclo Hidrológico" que consiste en una serie de cambios de fase, de características físicas, químicas, y microbiológicas, e incluso, de emplazamiento físico (mares, nubes, glaciales, ríos, aguas subterráneas) cuyo último efecto es la "renovación" periódica de la dotación de agua en las grandes acumulaciones de ésta del planeta: océanos, ríos y lagos, atmósfera y litosfera. El motor del "Ciclo Hidrológico" es la radiación solar recibida por la Tierra que provoca la evaporación de agua desde la superficie libre de océanos y mares hasta la atmósfera.



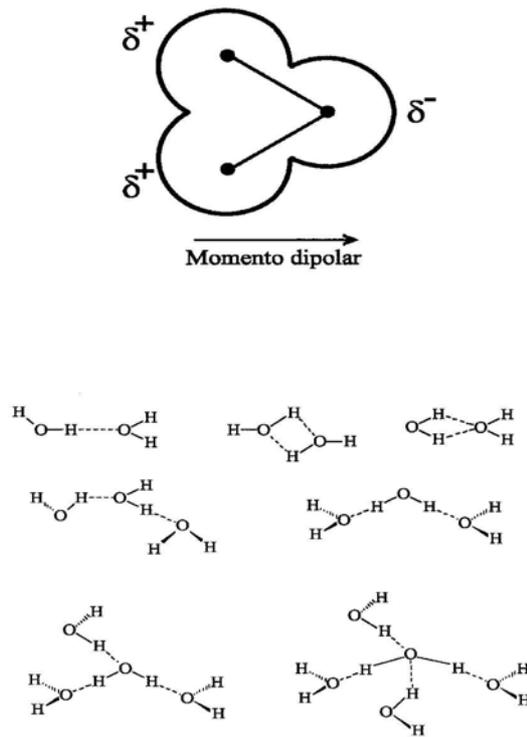
El uso que el hombre hace del agua varía dependiendo de la zona concreta del planeta: desde menos de 10 l/habitante y día en países subdesarrollados hasta unas 100 veces más en zonas industrializadas. El hombre utiliza el agua en:

- Bebida y preparación de alimentos.
- Riegos agrícolas y explotaciones ganaderas.
- Industrias: refrigeración y procesos varios.
- Navegación y comercio fluvial y/o marítimo.
- Usos deportivos y lúdicos.

- (f) Evacuación de vertidos y residuos variados.
- (g) Producción hidroeléctrica, termoeléctrica, etc...

2.-Algunas propiedades generales interesantes del agua

El agua líquida parece estar formada por asociaciones de moléculas de 2, 3 y hasta 12 unidades de "H₂O", estando dotada de una estructura tridimensional fluctuante, mientras el hielo es una mezcla de cuatro isómeros distintos, compuestos a su vez de diferente número de moléculas y/o con diferente estructura.



De densidad casi igual a la unidad (0,9999 g/cc a 20 °C), su tensión superficial varía con la temperatura, disminuyendo desde 75,5 din/cm a 0 °C hasta un valor nulo en el punto crítico (aquél en que coexisten los tres estados físicos de la sustancia) así como con los gases disueltos y con la presencia de otras sustancias en el agua.

Es poco compresible, teniendo una alta capacidad calorífica con un mínimo entre 34 y 35 °C. Esto actúa como bomba de calor en la regulación del clima de la Tierra, actuando los océanos como termostatos realizando un tránsito reversible de energía desde las aguas cálidas hacia las zonas frías.

La conductividad eléctrica del agua pura es muy baja ($\approx 0,05 \times 10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \text{ xcm}^{-1}$) incrementándose con la disolución de electrolitos, más cuánto más dissociado esté aquél. Conductividad y contenido salino de un agua natural fluyente (ríos, arroyos) suele ir incrementándose a través de su recorrido sobre el terreno por disolución de especies.

Además, el agua posee una alta reactividad que se pone de manifiesto en su poder de disolución de materiales. Un proceso de disolución implica el cambio en

propiedades físicas y químicas de la disolución ya constituida, con respecto tanto al soluto como al propio disolvente. Así, el ataque químico del líquido a las rocas y minerales en un medio natural, el cual se puede producir de diferentes formas:

(a)HIDRATACIÓN, o penetración del agua dentro de la red reticular del cristal, formando compuestos químicos denominados "hidratos" (p.e., el CaSO_4).

(b)HIDRÓLISIS, o descomposición mutua entre la sal que se disuelve y el agua.

(c)ÓXIDO-REDUCCIÓN. Se da tanto en la zona de infiltración y en el agua libre: implica el tránsito de electrones. El equilibrio redox se da entre el O_2 aportado por el aire disuelto en el agua que se infiltra, y el consumo del gas en procesos de oxidación de las sustancias reductoras existentes en el medio.

(d)pH, que puede provocar reacciones de disolución de sales presentes en rocas y minerales, sobre todo en condiciones ácidas (así la provocada por "lluvia ácida", rica en ácidos sulfúrico y nítrico de alto poder agresivo frente a materiales naturales y artificiales).

La solubilidad de gases en agua se rige por la ley de HENRY: a una temperatura dada, el volumen de un gas disuelto es proporcional a la presión parcial del gas.

Otro tipo de sistemas de interés en el agua son los sistemas "coloidales". Estos sistemas no son disoluciones verdaderas estando compuestos de partículas cuyo diámetro oscila entre 0,1 y 0,001 μm y poseyendo carga eléctrica, lo que los permite adsorber iones del mismo signo que el del electrólito que estabiliza la partícula coloidal.

Finalmente, las reacciones fisicoquímicas más importantes en sistemas acuosos y que rigen la fisicoquímica y lógicamente, la biología de un agua son las siguientes:

HIDRATACIÓN: $\text{Sólido} + n \text{H}_2\text{O} = \text{Sólido} \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$

ÁCIDO-BASE: $\text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{OH}^-$

REDOX: $2 \text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$

COMPLEJACIÓN: $\text{M} + n\text{L} = \text{M}\{\text{L}\}_n$

CAMBIO IÓNICO: $\text{R}^+ + \text{H}^+ + \text{M}^- = \text{R}^+ + \text{M}^- + \text{H}^+$

$\text{R}^+ + \text{OH}^- + \text{M}^- = \text{R}^+ + \text{M}^- + \text{OH}^-$

ADSORCIÓN: $n\text{Superficie} + \text{A} = \text{Superficie}_n\text{A}$

FOTOQUÍMICAS: $\text{Fotoreactivo} + h\nu = \text{Fotoreactivo}^*$

$\text{Fotoreactivo}^* = \text{Producto}$

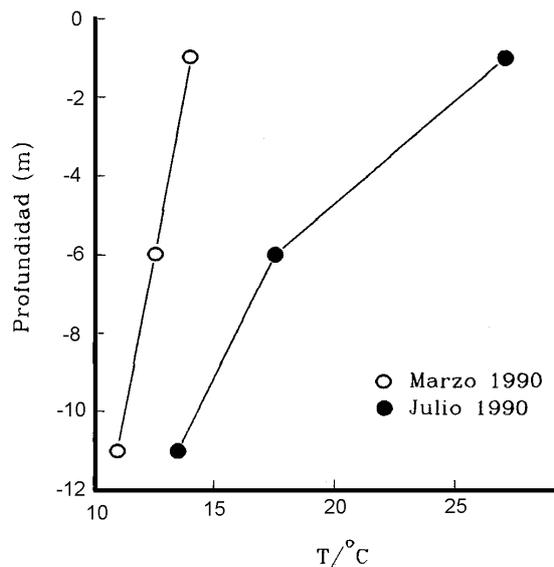
Vamos a pasar revista ahora a las propiedades fisicoquímicas más relevantes de las aguas comentando lo más importante de su evolución natural.

3.-Temperatura, color, olor-sabor

Temperatura

La temperatura de un agua se establece por la absorción de radiación en las capas superiores del líquido. Las variaciones de temperatura afectan a la solubilidad de sales y gases en agua y en general a todas sus propiedades, tanto químicas como microbiología. Aunque la temperatura de un agua superficial está ligada a la irradiación

recibida, la de las aguas profundas de embalses y lagos de nuestras latitudes experimentan una secuencia cíclica caracterizada por dos períodos: (a) uno de "mezcla térmica" con temperatura similar en profundidad, y (b) otro de "estratificación térmica" con aguas más cálidas en superficie y más frías en el fondo e imposibilidad de mezcla vertical de capas de agua. Estos períodos rigen las características fisicoquímicas de la masa de agua en cada caso (ver figura). La temperatura de las aguas subterráneas depende del terreno, naturaleza de las rocas, profundidad de la surgencia y fenómenos magmáticos que puedan existir.



Color

El color de un agua se debe a sustancias coloreadas existentes en suspensión o disueltas en ella: materias orgánicas procedentes de la descomposición de vegetales, así como de diversos productos y metabolitos orgánicos que habitualmente se encuentran en ellas (coloraciones amarillentas). Además, la presencia de sales solubles de Fe y Mn (aguas subterráneas y superficiales poco oxigenadas) también produce un cierto color en el agua. En aguas naturales de lagos y embalses suele existir una relación directa entre color y pH, de forma que cuando aumenta el segundo lo hace el primero. El color de las aguas profundas de lagos y embalses durante la época de estratificación térmica es marcadamente superior al del agua superficial.

Olor-sabor

Fisiológicamente, los sentidos del gusto y el olfato están íntimamente relacionados ya que las papilas linguales y las olfativas detectan estímulos simultáneos y complementarios. Solamente existen cuatro sabores básicos: ácido, salado, dulce y amargo. Todos los demás sabores se obtienen por interacción de estos reseñados.

Es muy raro que las sustancias productoras de olor y sabor se encuentren aisladas en un agua. No obstante, para sustancias aisladas se podría relacionar la intensidad de sabor/olor con la concentración de sustancia productora en el agua, p.e., mediante la fórmula de WEBER-FRECHNER, " $I = K \times \log C$ ", siendo "I" intensidad, "C" concentración y "K" un término de proporcionalidad constante. En la situación habitual, las sustancias con capacidad de producir olor/sabor en un agua pueden interactuar en tres formas:

Aditividad: o suma simple de olores/sabores.

Sinergismo: o incremento del olor/sabor con respecto a la suma simple de los individuales.

Antagonismo: o reducción del olor/sabor resultante con relación a lo esperado por adición simple.

Las fuentes de sabores y olores en un agua responden a dos orígenes: *naturales* y *artificiales*. Las primeras incluyen gases, sales, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y compuestos procedentes de la actividad vital de los organismos acuáticos. Los compuestos productores de olor/sabor de origen artificial pueden ser también orgánicos e inorgánicos y están probablemente más definidos, al poder identificarse la fuente concreta productora del problema.

Compuestos inorgánicos

El H_2S con su típico olor a huevos podridos en concentración alta y a moho o pantano en concentraciones bajas se suele detectar en aguas poco oxigenadas y en aguas profundas de lagos durante la estratificación térmica (verano/ otoño). Asimismo, la mayoría de las sales y minerales producen olor salado o metálico en un agua: Fe, Mn y Zn, como metales, mientras Cl^- , $SO_4^{=}$, HCO_3^- y NO_3^- como aniones.

Compuestos orgánicos

Geosmina, aceite neutro con un olor terroso o leñoso, producido por especies de Actinomicetos; **Mucidona**, con persistente olor a moho. Otros odorantes típicos son **metil-isoborneol**, **metilmercaptanos**, **sulfuro de dimetilo**, etc. Además, benceno y sustancias afines (origen natural e industrial) no se perciben en un agua salvo a concentraciones altas. Finalmente, los detergentes también son fuentes de olor/sabor.

Los organismos productores de olor/sabor en las aguas son todos los que pueden vivir en ellas: algas, hongos, bacterias, cianofíceas, organismos zooplanctónicos y en general, los que llevan a cabo la putrefacción de materias orgánicas y su descomposición.

4.-Turbidez-transparencia, residuo seco, conductividad, pH, E_H

Turbidez-transparencia

La presencia de materias en suspensión, arcilla, limos, coloides orgánicos, plancton y organismos microscópicos da lugar a la turbidez en un agua. Estas partículas (de dimensiones variables desde 10 nm hasta 0,1 mm) se pueden asociarse a tres categorías: minerales, partículas orgánicas húmicas y partículas filamentosas.

Las primeras provienen de la erosión de suelos y rocas, suelen estar revestidas de restos orgánicos, y conforman la mayor fracción de las materias en suspensión de la mayoría de las aguas. Los aportes de aguas turbias de escorrentía por lluvias, ricas en materias minerales causan aumentos de turbidez en aguas de ríos y embalses, así como las algas en época de su floración.

En aguas naturales, la turbidez evoluciona pareja a la del aporte de aguas de escorrentías al medio, a su vez provocada por las lluvias, especialmente, si éstas son torrenciales o se producen en terrenos susceptibles de fácil erosión. La turbidez se reduce con la sedimentación natural.

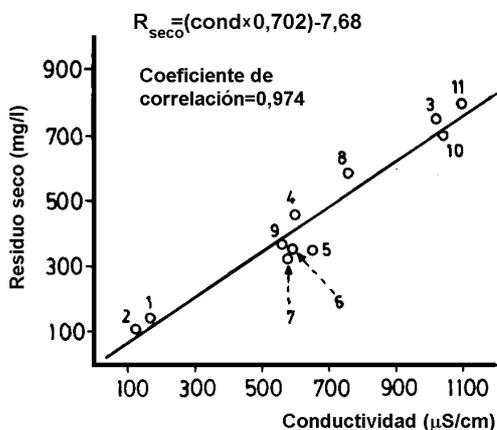
En embalses y lagos, el período de mezcla presenta alta turbidez en toda la columna de agua, mientras durante la estratificación térmica las aguas superficiales presentan baja turbidez que va incrementándose con la profundidad del agua. Respecto a la transparencia, medida utilizada en estudios limnológicos, está afectada por las floraciones algales en la masa de agua. Los valores de transparencia en lagos y embalses de nuestras latitudes suelen oscilar entre 1 y 5 m.

Residuo seco

El residuo seco indica la cantidad total de sales de un agua: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- y Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ . En ríos, el residuo seco puede evolucionar de tres formas: (a) apenas variando desde la cabecera hasta la desembocadura en ríos con aguas salinas en cabecera; (b) aumentando (la mayoría de los ríos); (c) disminuyendo. Finalmente, el residuo seco aumenta en las aguas en períodos secos por concentración de las sales disueltas, siendo en general más elevado en aguas subterráneas que en aguas superficiales, y en las marinas que en las continentales.

Conductividad

La conductividad es producida por los electrolitos disueltos en un agua y en ella influyen: terreno drenado, composición mineralógica, tiempo de contacto, gases disueltos, pH y todo lo que afecte a la solubilidad de sales. Existe una relación entre ella y el residuo seco que se ya vio más arriba. Concretamente, en un agua natural no muy contaminada, se cumple que el valor del residuo seco en mg/L oscila entre 0,5 y 1,0 veces el valor de conductividad, expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Residuo seco para las Cuencas Hidrográficas españolas (*)
(expresado en mg/l).

Cuenca	Máximo	Mínimo	Media
Norte de España	138	26	70
Duero	654	28	261
Ebro	1.084	92	379
Júcar	786	222	485
Guadalquivir	1.092	150	550
Tajo	3.436	112	745
Guadiana	4.136	76	1.038
Pirineo Oriental	1.730	574	1.085
Segura	2.500	202	1.287
Sur de España	6.426	358	2.136

(*) Fuente [2].

A título informativo, se recogen las conductividades de las aguas de la Península Ibérica más arriba. En embalses y lagos, la conductividad durante el período de mezcla suele ser inferior que en período de estratificación térmica, y en este caso, las aguas anóxicas del fondo presentan más altos valores de conductividad que las de superficie.

pH

Se debe al equilibrio carbónico y a la actividad vital de los microorganismos acuáticos. Respecto a lo primero, la secuencia de equilibrios de disolución de CO_2 en un agua, y la disolución de CO_3^{2-} e insolubilización de HCO_3^- , determinan el pH de un agua.

Además, la fotosíntesis reduce el CO_2 disuelto de un agua, mientras que la respiración de los organismos heterótrofos produce CO_2 causando efectos contrarios. Por otro lado, los ácidos naturales (H_2S o ácidos húmicos) acidificarían un agua mientras que la disolución de rocas y minerales de metales alcalinos y alcalinotérreos del terreno la alcalinizaría.

El valor de pH de aguas superficiales está entre 6-8,5, siendo las aguas subterráneas más ácidas que las superficiales. En lagos y embalses, el pH varía cíclicamente, disminuyendo con la profundidad del agua. Durante la mezcla el pH en la columna de agua es uniforme ($\pm 0,1-0,15$ u.pH); durante la estratificación térmica, las aguas superficiales ricas en fitoplancton que usan CO_2 como alimento aumentan mucho su pH ($>9,0$ u. pH). Las zonas profundas (pobres en O_2 y con flora reductora) exhiben valores de pH más bajos, del orden de 6,5 u.pH o inferiores.

Oxígeno, E_H

Su solubilidad depende de temperatura, presión, agitación del agua, contenido salino y consumo-producción por los organismos acuáticos. Las aguas superficiales suelen tener $>7-8$ mg/L mientras que las de fondo pueden llegar a estar anóxicas incrementando su contenido en especies químicas en bajo estado de oxidación (Fe^{2+} , Mn^{2+} , NH_3 ..). Además, el O_2 experimenta una variación cíclica ligada al comportamiento térmico de lagos (mezcla, estratificación, ver figura).

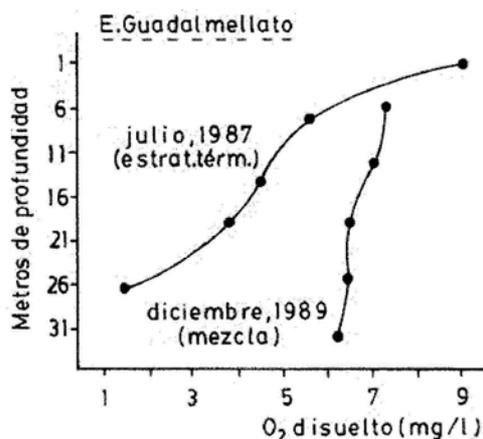


Figura 12.4: Evolución en profundidad de la concentración de O_2 en un embalse [208].

Finalmente, los vertidos residuales orgánicos agotan el O_2 de un agua natural por consumo de los organismos descomponedores allí presentes.

Ligado a la oxigenación se halla el potencial redox o E_H de un agua, que mide el estado de óxido-reducción de la misma y la contribución de especies electroactivas presentes. De comportamiento similar al del O_2 , aguas bien oxigenadas suelen presentar E_H positivos o ligeramente negativos, y aguas mal oxigenadas suelen presentar E_H claramente negativos. Otra forma de medir el potencial redox es el rH, definido por " $rH=[E_H/0,03]+2pH$ ".

5.-Compuestos de carbono

El CO_2 (0,0033% v/v en el aire) es poco soluble en agua, si bien en condiciones normales este proceso es capaz de generar uno de los aspectos más importantes y más estudiados de la Química del Agua, denominado "*equilibrio carbónico*", en virtud de que

puede disolverse en agua y actuar como cualquier ácido inorgánico, generando iones carbonato y bicarbonato. El CO_2 disuelto en el agua proviene de la respiración de los organismos acuáticos no fotosintéticos, de la descomposición de materias orgánicas, de la disolución ácida de carbonatos y de la lluvia. Su *secuestro*, es fundamentalmente a través de la función clorofílica realizada por plantas y microorganismos fotosintéticos (más adelante se presenta un esquema del ciclo del carbono).

En un agua natural, los equilibrios anteriores son más complejos por la intervención de los iones disueltos del agua, especialmente de Ca^{2+} y Mg^{2+} , cationes mayoritarios en las aguas. En concreto, existe un equilibrio que hace intervenir iones CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} dando lugar a la competencia de bicarbonatos relativamente solubles, y de carbonatos más insolubles, de los metales anteriores. Cuando en un agua existe CO_2 libre, éste reacciona con los carbonatos presentes, solubilizándolos a través de su transformación en bicarbonatos y alcalinizando el agua. Por contra, los propios bicarbonatos pueden a su vez disociarse e insolubilizarse rindiendo CO_2 y acidificando el pH del medio. A esta dinámica se denomina *equilibrio carbónico* de un agua.

Así pues, un agua puede calificarse de *agresiva* si disuelve CaCO_3 incrementando su valor de pH. Por contra, si deposita carbonato desde el bicarbonato soluble y reduce su valor de pH, se califica de *incrustante*. Se puede calcular un valor de pH, propio para cada agua y dependiente de la temperatura, en el cual no manifiesta tendencia ni a precipitar carbonato, ni al solubilizarlo; a esta magnitud se la denomina "pH de equilibrio" o pH_e y su cálculo es fundamental en estudios de aguas. En general, el pH_e de la mayoría de las aguas naturales suele oscilar entre 7,0 y 9,5, siendo más bajo a mayor salinidad. Las relaciones entre C inorgánico y orgánico dan lugar al Ciclo Bioquímico del Carbono.

Cianuros

Aparte de los compuestos del equilibrio carbónico y del C orgánico, otro compuesto carbonado son los cianuros, con alto poder contaminante y que provienen de la actividad industrial. El cianuro en disolución se halla disociado, y en aguas naturales se encontrará fundamentalmente como especie no disociada de mayor toxicidad que la especie iónica.

Los CN^- metálicos, p.e., de cobre, plata y zinc, poco solubles, se solubilizan mediante procesos de complejación en presencia de cianuros alcalinos, potenciando su toxicidad en función de su mayor o menor posibilidad de formar HCN en su proceso de disociación. Por otro lado, los cianuros complejos experimentan reacciones de descomposición producidas por la exposición solar directa que generarían HCN tóxico. Este proceso, en aguas turbias o poco iluminadas sería muy lento y unido a la difusión de HCN hacia la atmósfera y a su destrucción química y microbiológica permiten evitar la acumulación de altos niveles muy tóxicos de HCN en medios acuáticos.

6.-Compuestos nitrogenados

El N es el elemento más abundante en la atmósfera (80% v/v) hallándose también en toda la biosfera (en los seres vivos se localiza en las proteínas). Los principales compuestos nitrogenados presentes en la naturaleza, además del atmosférico y del nitrógeno orgánico, son nitratos, nitritos y amonio. El N atmosférico puede ser fijado por ciertos microorganismos (terrestres y acuáticos), y los compuestos nitrogenados de las

oxigenación

Nitritos

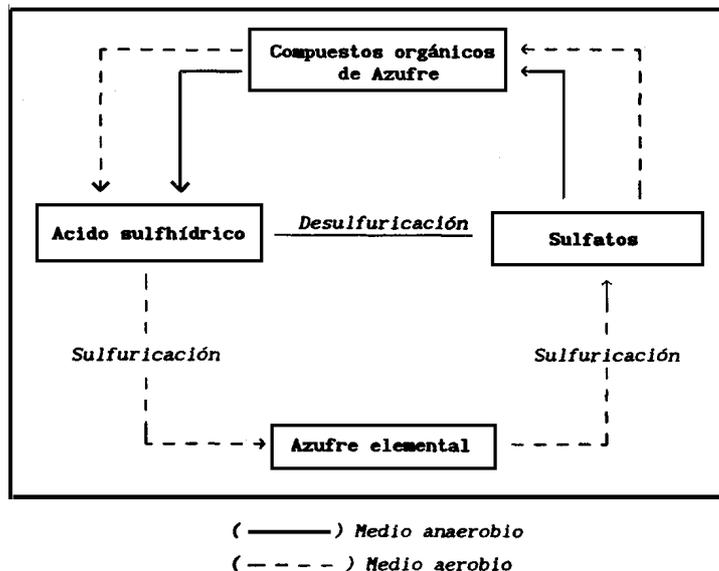
Son un estado intermedio de oxidación entre el amonio y los nitratos. En aguas superficiales su concentración no suele superar los $0,100 \text{ mg/L}$, siendo mucho más abundantes en ríos contaminados por aguas residuales urbanas y/o industriales. También se dan en aguas subterráneas pobres en oxígeno, así como en zonas anóxicas de lagos y embalses estratificados térmicamente. Los NO_2^- , al igual que los NO_3^- pueden transformar en el interior del organismo la hemoglobina en metahemoglobina, dificultando la respiración celular, además de presentar potencial capacidad cancerígena.

Nitratos

Proceden de disolución de rocas y minerales, de la descomposición de materias vegetales y animales, y de la contaminación por efluentes agrícolas e industriales. En aguas de superficie no contaminadas no suelen superar los 10 mg/L , pero en aguas subterráneas contaminadas por abonados pueden superar ampliamente los 50 mg/L . Las aguas depuradas vía biológica pueden contener cantidades importantes de NO_3^- mediante el conocido proceso de nitrificación biológica.

7.-Compuestos de azufre

Los principales compuestos azufrados presentes en un agua son: H_2S , S^{2-} , SO_3 , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ y SO_4^{2-} . En ocasiones, también existe S coloidal, p.e., en las fumarolas volcánicas de zonas continentales emergidas como en las surgencias de aguas calientes que se encuentran habitualmente en las dorsales mesoceánicas. Existe un ciclo bioquímico del azufre similar al ya comentado del carbono que liga S inorgánico con S orgánico.



Sulfuros

Las especies sulfuradas en un agua son S^{2-} , HS^- y H_2S . En aguas de $\text{pH} < 7$ existirá mayoritariamente H_2S libre y a $\text{pH} = 7$ habrá cantidades similares de H_2S y HS^- .

Al ser el ácido más tóxico, las aguas ácidas serán más tóxicas que las de pH más alto. El sulfuro se insolubiliza con varios metales impidiendo su posterior oxidación. En aguas oxigenadas no existe H_2S libre siendo habitual en aguas residuales y en aguas profundas desoxigenadas de lagos y embalses, hasta en concentraciones de $0,5 \text{ mg/L}$.

Sulfitos

Son un estado de oxidación intermedia entre sulfuros y sulfatos, su presencia en un agua indica contaminación industrial. Son bastante tóxicos por consumo de oxígeno.

Sulfatos

Bastante solubles, proceden de disolución de yesos y de la oxidación bacteriana de sulfuros. Su concentración en ríos oscila entre 20 y 50 mg/L , alcanzando más de 400 mg/L en ríos mediterráneos. La presencia de sulfatos en aguas de construcción conduce a la destrucción de los hormigones por formación de la sal de CANDLOT-MICHAELIS.

8.-Compuestos fosforados

Elemento esencial para la vida, está implicado en un complejo ciclo bioquímico que implica el tránsito del elemento a través una serie de estados inorgánicos y orgánicos, que lo transforman vía microbiana. El P de un agua procede de: (a)disolución de rocas y minerales; (b)lavado de suelos en los que se encuentra como resto de actividades ganaderas o agrícolas; (c)aguas residuales domésticas (los detergentes domésticos –tripolifosfatos- aportan el 50% del P presente en los vertidos urbanos). A su vez, el P de un agua se reparte entre compuestos inorgánicos, orgánicos (disueltos o en suspensión) y P en tejidos vivos.

El P es factor limitante para el fitoplancton pero se agota si no se renueva pues no es fijado desde la atmósfera. Por contra, si su contenido es muy alto se produce un gran incremento de la actividad fitoplanctónica con los consiguientes problemas de agotamiento de oxígeno del agua y exceso de materia orgánica, los cuáles dan lugar a los conocidos fenómenos conocidos bajo el nombre de "eutrofización", también experimentados con los nitratos. El P total de aguas naturales no contaminadas está entre $0,1 \text{ mg/L}$ y $1,0 \text{ mg/L}$.

9.-Sílice

El silicio es el elemento mayoritario de las rocas (silicatos, feldespatos, etc...). Los silicatos de más alta solubilidad son los de Na y K que se disuelven tras meteorizarse previamente el mineral origen. La sílice en un agua responde a dos estados: coloidal o disuelta (ácido silícico). Estas dos especies se hallan en un equilibrio de reversible de interconversión polimerización-despolimerización. Las concentraciones de SiO_2 en aguas naturales oscilan entre 1 y 30 mg/L . En aguas de lagos y embalses, la distribución vertical en profundidad depende de la actividad de los microorganismos silíceos (*Diatomeas*) que *consumen* sílice y de la devolución de ésta al medio hídrico a través de la descomposición de sus cadáveres; también depende de la solubilización de las rocas silíceas del vaso del lago, de la descomposición de los silicatos por procesos bioquímicos y de fenómenos de co-precipitación conjunta de SiO_2 y oxihidróxidos de Fe y Mn en aguas profundas de lagos y embalses. Así, se da el incremento del contenido en SiO_2 en un lago con la entrada de aguas de escorrentía turbias ricas en silicatos tanto en

suspensión, como coloidales y parcialmente disueltos, y el progresivo descenso de las concentraciones de la sustancia en función de la sedimentación experimentada por el lago.

10.-Halógenos

Fluoruros

El F se encuentra en diversos minerales, como topacio, fluorita (CaF_2), fluorapatito ($\text{CaF}_2 \times 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), etc., así como en algunas micas (flogopita). Dada la escasa solubilidad de estas rocas y minerales, la concentración de F^- en aguas naturales no suele superar en valor medio el mg/L , pudiendo ser mucho mayor en zonas volcánicas ricas en rocas fluoradas (hasta 20 mg/L en zonas de Kenya), y en algunas aguas minerales. En este sentido, aguas minerales de la cornisa cantábrica española presentan hasta 6 mg/L .

Cloruros

Muy abundantes en los océanos, a donde acceden por disolución de depósitos minerales de *sal gema* (NaCl), representan hasta un 0,05% de la litosfera. La concentración de Cl^- en aguas de superficie no contaminadas se sitúa alrededor de $20\text{-}40 \text{ mg/L}$ e incluso menores. En ríos, es típico su incremento a lo largo del recorrido del cauce fluvial desde su nacimiento. En aguas subterráneas, las concentraciones pueden variar mucho en función de la intrusión marina en determinados acuíferos: así, en zonas del Levante español se han medido hasta 2 g/L ; sin embargo, también pueden medirse contenidos tan bajos como 5 mg/L . Cloruros, fosfatos y nitritos son indicadores típicos de contaminación residual doméstica vertida a un cauce natural.

Bromuros y yoduros

Tanto unos como otros se encuentran en cantidades mínimas en las aguas, no superando más que algunas decenas de microgramos por litro, y hallándose en mayor cantidad, en general, en aguas subterráneas que en superficiales. La presencia de cantidades cercanas al mg/L de Br^- en un agua, puede indicar una probable contaminación de carácter industrial o por intrusión marina del acuífero.

Finalmente, los yoduros que juegan un papel muy relevante en fisiología humana (acumulándose fundamentalmente en el *tiroides*) aún se encuentran en menor proporción en las aguas (del orden de sólo $\mu\text{g/L}$) salvo casos concretos.

11.-Metales en aguas

Nos referiremos a los más importantes biológica y ambientalmente que son casi todos los considerados por la normativa española vigente para aguas de consumo.

Aluminio

Elemento moderadamente frecuente en aguas naturales, puede variar su concentración allí entre $0,012$ y $2,25 \text{ mg/L}$, siendo más alta en aguas más ácidas. Puede formar muchos complejos con aniones variados. Desde el punto de vista toxicológico parece probada su relación con la *enfermedad de Alzheimer* en personas sometidas a diálisis, por el incremento de Al en estos líquidos de diálisis.

Antimonio

Llega a las aguas por disolución de minerales sulfurosos (donde está como impureza) y se encuentra en forma de Sb^{3+} y Sb^{5+} , en niveles inferiores a $4 \mu g/L$ aunque en zonas de Reino Unido puede llegar hasta los $12 \mu g/L$.

Arsénico

Impureza en muchos minerales (p.e., de cobre, plomo, zinc y cobalto) accede a las aguas por disolución de sus sales y de sus complejos orgánicos procedentes de emisiones volcánicas o de vertidos industriales metalúrgicos, de insecticidas o de refinado de metales. En aguas bajo condiciones poco oxidantes o reductoras se encuentra mayoritariamente As^{3+} , mientras que en aguas de ambientes muy oxidantes existe As^{5+} . La concentración de As en aguas naturales suelen ser $<10 \mu g/L$, pero en aguas subterráneas contaminadas pueden llegar hasta algunos mg/L . En zonas del mundo volcánicas o con agriculturas intensivas se incrementan los niveles medidos: $0,6-2,0 mg/L$ en Taiwan, $3,0 mg/L$ en Japón, $0,9-3,4 mg/L$ en Argentina y $1,7 mg/L$ en EEUU.

Boro

Ampliamente difundido en la naturaleza asociado a numerosos minerales como granitos, pegmatitas y boratos, estos últimos sobre todo, sódicos y cálcicos. Además, el B es muy empleado por el hombre en la formulación de detergentes (como perboratos o boratos) desde donde accede al medio acuático, así como por el empleo de pesticidas, barnices y pinturas boradas. El B forma numerosos complejos con molibdatos, tungstatos, vanadatos, fosfatos y arseniatos así como con ácidos húmicos y fúlvicos. Las aguas naturales no contaminadas presentan bajos niveles de B (entre $10 \mu g/L$ y $50 \mu g/L$.) mientras que las aguas residuales y las subterráneas contaminadas por las primeras presentan valores sustancialmente más altos: así en zonas de Granada y Barcelona se han detectado hasta $2,50 mg/L$ en aguas de pozos. Niveles altos de B también indican fenómenos de intrusión marina por sobre-explotación de acuíferos.

Fisiológicamente, una vez producida la ingestión de boratos, el tiempo de permanencia en el organismo es escaso ya que son completamente adsorbidos por el tracto gastrointestinal y rápidamente excretados por los riñones. Además, los efluentes borados pueden afectar negativamente a los peces llegando a provocar su mortandad.

Cadmio

Se halla asociado a minerales de zinc siendo muy empleado en la fabricación de pilas botón si bien cada vez menos por su extrema toxicidad. El Cd forma numerosos complejos con aniones, existiendo gran variedad de sales moderada o incluso bastante solubles en agua. El comportamiento fisicoquímico del Cd en un agua depende de su compleja especiación química, regida por el pH del medio y por la dureza del agua así como por la presencia de ligandos orgánicos e inorgánicos y de metales fácilmente intercambiables por cadmio. No obstante, a medida que el medio es más ácido la solubilidad se incrementa. En este sentido, las aguas superficiales suelen normalmente contener $<1 \mu g/L$ de Cd. Además, las aguas naturales ricas en compuestos húmicos y fúlvicos contienen aún menores concentraciones de Cd libre debido a la alta estabilidad de los complejos formados entre el metal y las sustancias húmicas.

El Cd es un metal que experimenta fenómenos de bio-acumulación en el organismo de manera similar a la que se comentará en su momento para el mercurio.

En concreto, el Cd es fácilmente adsorbido por las raíces de los vegetales (especialmente arroz y trigo) regados con aguas contaminadas por el elemento, ingresando subsiguientemente en el ser humano mediante ingesta de estos vegetales o de alimentos contaminados, o bien directamente mediante el consumo de agua de bebida rica en Cd.

El destino final del Cd en el organismo es el hígado, los riñones y el sistema óseo. Sus efectos toxicológicos dependen de la cantidad ingerida, y pueden variar desde simples dolores de estómago hasta daños mucho más graves en los pulmones. Además, las exposiciones prolongadas al Cd pueden causar alteraciones renales y en el sistema óseo del individuo dando lugar a la *enfermedad de Itai-Itai*, que se detectó por primera vez en la ciudad japonesa de este nombre, como resultado del consumo habitual por la población de pescado con altas tasas de Cd. A su vez, el pescado había ingerido Cd a consecuencia del enriquecimiento en el contaminante de las aguas costeras de aquella zona que estaban siendo contaminadas por efluentes industriales procedentes de una mina de zinc próxima a la ciudad.

Cobre

Se encuentra en la naturaleza en forma elemental, o bien formando variados compuestos como óxidos, sulfatos complejos y carbonatos, sobre todo, generalmente muy solubles. En las aguas naturales se suelen encontrar concentraciones bajas de Cu, entre 1 y 100 $\mu\text{g/L}$, encontrándose valores más altos pero siempre inferiores a 1 mg/L , en aguas ricas en sustancias y compuestos húmicos, y en general, ricas en materias orgánicas. En este sentido, en aguas con elevados contenidos en amonio existen complejos cupro-amoniacaes de alta estabilidad. El Cu, elemento traza esencial para el ser humano, está involucrado junto al cobalto y al hierro en la producción de hemoglobina y eritrocitos, y por lo tanto, en la formación del sistema óseo y del sistema nervioso. Además, entra en la formación de varias enzimas como la citocromo oxidasa y la oxidasa del ácido ascórbico.

Por otra parte, contenidos moderados de Cu en aguas naturales tienen un efecto negativo sobre varias especies de pescados.

Cromo

Este metal se encuentra naturalmente bajo forma del mineral **cromita** y en aguas forma complejos aminados y cianurados (Cr^{2+}), complejos de relativa estabilidad con cloruros, fluoruros, sulfatos, sales amónicas, cianuros, sulfocianuros, oxalatos y citratos (Cr^{3+}) así como cromatos (Cr^{6+}) de otros metales. Existe oxidación de Cr^{3+} hacia Cr^{6+} tanto electroquímicamente como de forma biológica. Estos procesos suponen un complicado equilibrio entre la disolución y la precipitación de los compuestos de Cr en las aguas naturales. Así, la acción reductora de la materia orgánica sobre compuestos de Cr^{6+} conduce a la generación de complejos orgánicos de Cr^{3+} , proceso que ha sido ampliamente estudiado. Por otra parte, la principal fuente de Cr hacia las aguas son los efluentes industriales de inhibidores de corrosión y pigmentos para pinturas y barnices.

Las concentraciones totales de Cr en aguas naturales no contaminadas no suele superar los 25 $\mu\text{g/L}$; no obstante, estos niveles pueden incrementarse en aguas con valores de pH inferiores a 6,0, así como en aguas de elevada dureza.

Fisiológicamente, el Cr es un metal traza esencial estando involucrado en el

metabolismo de la glucosa como un co-factor de la insulina. Además, este metal presenta el efecto beneficioso de incrementar la adsorción de proteínas y aminoácidos por parte de las células del organismo. Por el contrario, la excesiva ingestión de compuestos de Cr^{3+} provoca alteraciones toxicológicas en el ser humano, mientras que pequeñas ingestiones de Cr^{6+} puede acarrear alteraciones cutáneas, así como problemas pulmonares graves que pueden incluso desembocar en el desarrollo de cáncer de pulmón.

Hierro

El Fe es muy abundante tanto en forma de compuestos divalentes como trivalentes. Los compuestos más frecuentes son hidróxidos, carbonatos y sulfuros. El Fe^{2+} suele formar complejos con aminas, compuestos orgánicos hidroxilados, hipofosfitos, oxalato y cianuro, sobre todo. Por su parte, el Fe^{3+} es complejado por iones cloruro, sulfato, tiocianato y acetato, con los que forma complejos de baja estabilidad. En contraste, los complejos generados por Fe trivalente y fluoruro, pirofosfato, fosfato, compuestos orgánicos hidroxilados y oxalato son mucho más estables.

El Fe presente en un agua proviene de disolución de rocas y minerales, así como de aguas residuales procedentes de la producción de acero y otros materiales. En general, el Fe se encuentra en forma trivalente en las aguas naturales superficiales, variando su concentración típicamente entre $0,01 \text{ mg/L}$ y $0,30 \text{ mg/L}$, no superándose estos niveles ya que a valores de pH en torno a la neutralidad se produce la precipitación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ hidratado que es la sal más común en medios hídricos oxigenados. Por contra, las sales de Fe divalente son apreciablemente más solubles, comenzando su precipitación por debajo de valores de $\text{pH}=6,0$. De este modo, las aguas subterráneas (o aguas profundas de lagos y embalses) ricas en CO_2 y poco oxigenadas, presentan con frecuencia más altos contenidos en Fe total que las aguas de superficie bien aireadas. Este proceso se favorece por la elevada estabilidad de los complejos entre Fe^{2+} y materia orgánica. Respecto a esto, aguas profundas de embalses y lagos prácticamente desprovistas de oxígeno disuelto ($<2,0 \text{ mg/L}$ de O_2) pueden contener cantidades superiores a algunos mg/L , o incluso del orden de algunas decenas de mg/L de Fe total. De este modo, las concentraciones de este metal en aguas naturales pueden oscilar muy ampliamente (dependiendo de su origen concreto) entre sólo algunas décimas de $\mu\text{g/L}$ y 50 mg/L .

La dinámica del Fe en lagos y embalses evoluciona desde unas bajas concentraciones de Fe total en toda el agua del lago, período que coincide con el de mezcla térmica y con el de elevada oxigenación en toda la masa hídrica, hasta elevados contenidos (sobre todo de Fe^{2+}) en las aguas más profundas (y desoxigenadas) del lago durante el período de estratificación térmica. Estas altas cantidades de Fe^{2+} se generan tanto mediante reducción química como biológica a partir de los precipitados de Fe^{3+} existentes en los sedimentos y fangos del fondo del lago. Este comportamiento es similar al exhibido por el fósforo y de Mn. Además, existen fenómenos de oxidación-reducción entre Fe divalente y trivalente, por vía fotoquímica, producidos en aguas superficiales.

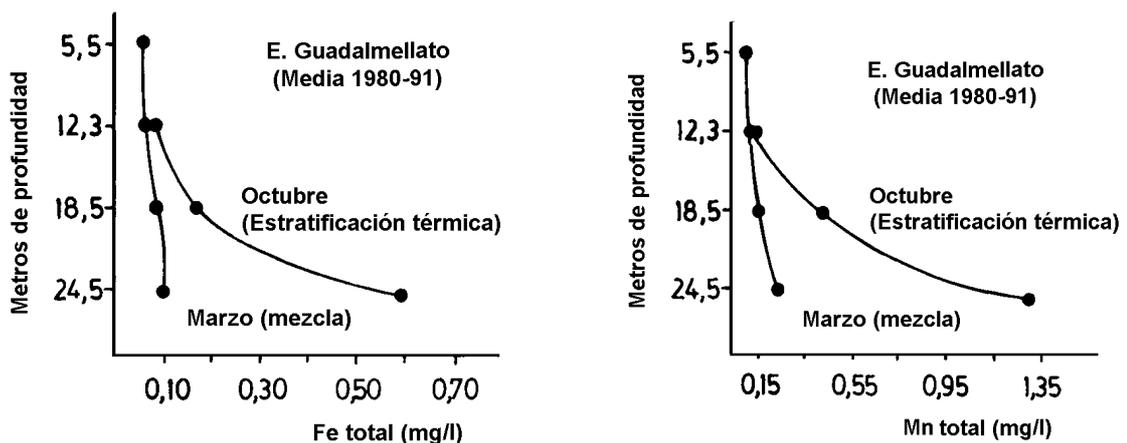
Desde un punto de vista fisiológico, el Fe se encuentra en muchas proteínas (p.e., hemoglobina), citocromos y en varios enzimas redox, siendo el responsable de la respiración celular. Por otro lado, la ingestión de elevadas cantidades de compuestos

de Fe provoca importantes alteraciones llegando a la necrosis (si bien de índole reversible) en varios tejidos humanos.

Manganeso

Es un elemento ampliamente difundido en la naturaleza, siendo la **pirolusita** (dióxido de manganeso) su mineral más frecuente. Las rocas y minerales que contienen Mn son fácilmente solubles en aguas neutras o ligeramente ácidas en condiciones oxidantes moderadas, mediante la formación del ion manganeso. En condiciones ligeramente oxidantes puede producirse la oxidación del Mn^{2+} hacia Mn^{4+} con la generación de compuestos fácilmente precipitables por su escasa solubilidad. Según el estado de oxidación del metal se formarán diferentes complejos; así, el Mn^{2+} es complejoado por fluoruro, fosfato, oxalato y compuestos aminados; el Mn^{3+} forma complejos clorurados, fosfatados, sulfatados, cianurados y con oxalato; finalmente, los complejos más frecuentes del Mn^{4+} se generan con cloruro, fluoruro y cianuro. Los contenidos en Mn de aguas naturales bien oxigenadas son bajos debido a que los compuestos de Mn más solubles son los de Mn^{2+} y esta especie es minoritaria en ambientes oxidantes. De este modo, en un agua aireada la oxidación del Mn^{2+} mediante el aire disuelto es relativamente rápida y subsiguientemente se produce la precipitación de compuestos poco solubles de Mn^{4+} , especialmente de MnO_2 hidratado.

Por otro lado, este elemento se puede encontrar en un agua en varias formas químicas: como especie disuelta, en forma coloidal o bien formando complejos variados. En general, los contenidos de Mn en aguas naturales oscilan entre sólo algunos $\mu g/L$ (aguas oxigenadas) hasta $0,50 mg/L$, o incluso más de $1 mg/L$ en aguas poco oxigenadas. Así, las aguas subterráneas ricas en materiales orgánicos y pobremente oxigenadas, así como las aguas profundas anóxicas de lagos y embalses durante su período de estratificación térmica pueden superar los 2 a $3 mg/L$ de Mn total, lo cual está asociado al acusado ambiente reductor que allí se experimenta en estas situaciones.



De cualquier forma, el comportamiento descrito más arriba puede explicarse atendiendo a la compleja dinámica redox que experimenta el Mn similar a la ya descrita para el Fe.

Desde la óptica fisiológica, el Mn es un elemento traza esencial que está involucrado en la síntesis de flavoproteínas, en la dinámica del colesterol y en la

producción de hemoglobina. También posee una conocida acción catalizadora sobre varios procesos enzimáticos. Tal es así, que la deficiencia de este metal en el organismo puede acarrear problemas cardíacos, anemia y malformaciones óseas diversas en niños. Por contra, consumos de aguas con cantidades elevadas de Mn (>14 mg/L) pueden provocar daños en el cerebro. No obstante, el Mn no está catalogado como sustancia carcinógena por la IARC.

Mercurio

El Hg accede a las aguas a través de emisiones volcánicas, y sobre todo, ligado a efluentes residuales procedentes de la producción de cementos, combustión de fuel, fabricación de baterías, así como de la producción de hidróxido sódico y cloro. Además, algunos pesticidas contienen Hg en sus formulaciones. El Hg^+ forma sales moderadamente solubles tales como sus haluros, cromatos y sulfuros. Por su parte, los yoduros, tiocianatos y sulfuros de Hg^{2+} también son relativamente solubles. Además, el Hg^{2+} es capaz de generar una amplia variedad de complejos de relativa estabilidad como los clorurados, bromurados, yodurados, tiocianurados, cianurados, aminados, sulfurados y tiosulfurados. Por otra parte, los niveles de Hg en aguas no contaminadas no suelen superar el $\mu\text{g/L}$. Sin embargo, estos niveles pueden incrementarse notablemente en aguas contaminadas, como es el caso de algunas aguas superficiales de Alemania en las cuales se han podido medir hasta 0,40 mg/L del metal.

El Hg es un elemento sujeto a fenómenos de *biotransformación* una vez accede al medio ambiente, lo que incrementa enormemente su potencial tóxico. En este sentido, el contenido de Hg en un agua se divide entre formas inorgánicas de Hg^+ , tales como cloruro e hidróxido (especialmente), y compuestos orgánicos de Hg^{2+} , de mucho más alto poder toxicológico, tales como los derivados metilados, dimetilados y fenólicos. Así, el Hg^+ que llega a un agua bien oxigenada, y sobre todo, con pH ácido (<5,0) es rápidamente oxidado a Hg^{2+} , el cual puede a su vez reaccionar de acuerdo a dos procesos:

(a) Puede ser reducido totalmente a Hg elemental por algunos microorganismos (p.e. varias especies de *Pseudomonas*), con lo cual se evapora a la atmósfera, en donde se oxida a Hg^+ pasando después desde aquí a las aguas y suelos asociado a las lluvias.

(b) Puede formar complejos organo-mercuriados muy tóxicos, especialmente, el metil-mercurio y el dimetil-mercurio. Para esto el Hg^{2+} de un agua, que suele estar asociado a partículas orgánicas o microorganismos, o incluso englobado en los sedimentos del fondo de un cauce hídrico, experimenta un fenómeno de *metilación*, el cual puede discurrir tanto en aguas bien oxigenadas como en medio anóxico. En medios oxigenados, el proceso rinde primero metionina mercúrica cuya rotura produce finalmente los derivados mono- y di-metilados. Además, si el pH del agua fuese ácido, la formación de metil-mercurio está favorecida frente a la del compuesto dimetilado.

Tanto el Hg como sus derivados tienen un elevado potencial tóxico pues suelen ser rápidamente adsorbidos por cualquier ser vivo. Por otro lado, dada su muy lenta cinética de eliminación desde el organismo, este metal exhibe el ya referido fenómeno de la *bioacumulación*. Esto supone que a medida que se asciende en la cadena trófica, la cantidad de Hg almacenada en los organismos de eslabones superiores es más alta. Este fenómeno fue puesto de manifiesto claramente en la ciudad japonesa de Minamata: el Hg existente en los efluentes residuales que desembocaban en el mar procedentes de una industria próxima a la ciudad, era consumido y acumulado por el fitoplancton del agua costera, pasando después al zooplancton, posteriormente al pescado y finalmente desde

este pescado *rico* en Hg a los seres humanos que se alimentaban de aquél. Por esta ruta, los niveles de Hg existentes en las personas eran considerablemente más altos que las emisiones primitivas del metal en los efluentes industriales.

Desde el punto de vista fisiológico el Hg se acumula en tejidos grasos, cerebro, riñones, músculos, huesos y sistema nervioso, provocando alteraciones y parálisis muscular, problemas visuales y daños cerebrales. Además, puede causar alteraciones en las enzimas involucradas en el sistema circulatorio. Pese a lo anterior, la IARC no lo cataloga como carcinógeno.

Níquel

Este metal se encuentra naturalmente formando arseniatos y sulfuros. Es empleado por el hombre en procesos de fusión para fabricar diversas aleaciones metálicas, como catalizador para preparación de compuestos orgánicos y también lo incluyen en sus formulaciones algunos pesticidas. Las sales de Ni son razonablemente solubles en agua, formando además complejos clorurados, sulfurados, aminados, y con oxalato, tiocianato, metafosfato, pirofosfato y cianuro.

Los niveles medios de Ni en aguas superficiales no suelen superar los 5 a 10 $\mu\text{g/L}$, si bien a veces se han medido concentraciones superiores a 1 mg/L . Las aguas subterráneas suelen presentar contenidos de Ni más altos: así, aguas subterráneas de Rusia con hasta 13 mg/L .

Desde el punto de vista fisiológico, el Ni no es muy tóxico, si bien algunas de sus sales pueden tener potencialmente efectos carcinogénicos y mutagénicos de acuerdo a investigaciones de laboratorio. En la actualidad tanto el metal como sus sales solubles son catalogados por la IARC como carcinógenos por exposición pulmonar. Además, la ingestión de importantes cantidades de Ni puede provocar en el organismo problemas renales, pudiendo dar lugar también a alergias cutáneas por contacto.

Plomo

Este metal es muy empleado por el hombre como aditivo de combustibles (gasolinas), si bien su uso está en continuo descenso debido a su incremento en el ambiente. También se utiliza en la fabricación de baterías, pinturas, como aislante de radiaciones ionizantes y en formulaciones de pesticidas. El Pb^{2+} forma complejos con nitratos, cloruros, cianuros, y con ácidos como el acético, los orgánicos hidroxilados y el tiosulfúrico. Además, forma sales moderadamente solubles con cloruro, bromuro, yoduro, fluoruro, sulfato y carbonato.

El Pb metálico expuesto al aire sufre en primer lugar un proceso oxidativo inducido por el oxígeno atmosférico, que lo convierte en hidróxido, siendo posteriormente atacado por el CO_2 para dar lugar a una fina película de carbonato que protege al metal de posteriores corrosiones. En ambientes salinos, o aguas saladas o salobres, el metal reacciona con los aniones allí presentes transformándose en sales estables como los haluros y los sulfatos correspondientes.

En aguas naturales no contaminadas el contenido en Pb total (disuelto, coloidal y asociado a partículas) oscila entre 50 $\mu\text{g/L}$ y 10 mg/L , mientras que la fracción de Pb disuelto no suele superar los 10 $\mu\text{g/L}$. El Pb se ha usado históricamente en la elaboración de tuberías de conducción de agua potable, debido a su, en principio, inercia química, circunstancia que ha posibilitado que el contenido en este elemento de algunas aguas potables de carácter ácido y baja salinidad se haya incrementado hasta los 2 mg/L (así en

algunas zonas de Escocia). Lo anterior ha hecho que desde hace varios años se esté sustituyendo este metal en las tuberías de agua de consumo por hierro, aceros, cobre y materiales sintéticos.

Elemento no esencial desde la óptica fisiológica, sí posee carácter tóxico. Esta toxicidad es más acusada frente a los organismos autóctonos de las aguas naturales a medida que el agua presenta una menor dureza. Respecto al ser humano, el Pb provoca la conocida enfermedad del *saturnismo*, caracterizada por la acumulación del metal en los huesos, y especialmente nervios, sistema renal e hígado. El saturnismo causa anemia, parálisis, dolores de cabeza y alteraciones enzimáticas y en los tejidos adiposos en donde preferencialmente se aloja. A esto hay que unir su carácter de carcinogénico, tanto del metal como de sus sales inorgánicas, todos los cuales son incluidos por la IARC en el grupo 2B (posiblemente carcinógenos por ingestión).

Sodio

El empleo de las sales sódicas por el hombre es diverso: así en industrias de salazón y en procesos electrolíticos (cloruro), en producción de pulpa de papel y papel, fabricación de productos farmacéuticos (hipocloritos) y tratamiento y depuración de aguas (hipocloritos, cloritos), fabricación de abonos e industria química en general (nitratos) e incluso como anticongelante en carreteras sometidas a fuertes nevadas o con problemática de formación de placas de hielo (adición de NaCl). A estas fuentes potenciales de emisión de Na al ambiente hemos de sumar las aguas fecales humanas, así como la substitución natural de sodio por potasio interlaminar en las arcillas.

En aguas naturales continentales, el Na es uno de los metales mayoritarios siendo el tercero o incluso el segundo en orden de abundancia (hasta 300 mg/L) mientras en aguas marinas y salobres se erige como el metal más abundante: alrededor de 10 g/L. Es conocido el sabor salado que imprime el Na a las aguas. La percepción de este fenómeno está asociada con la temperatura del agua y con la sal en concreto contenida en el medio; en concreto, los umbrales de sabor para varias sales sódicas sigue la secuencia: carbonato<cloruro<nitrato<sulfato<bicarbonato.

Fisiológicamente, la presencia de altos contenidos de Na en la sangre está asociada a problemas cardiovasculares, hipertensión, patologías renales y hepáticas, así como intoxicación en mujeres embarazadas y en niños. La IARC no lo cataloga como carcinógeno.

Selenio

Ligado a materiales volcánicos se encuentra en forma de selenitos y seleniatos. Los primeros en aguas con ambiente relativamente reductor y los segundos en ambientes oxidantes. En aguas la concentración de Se total no excede de 10 µg/L. Si bien es un elemento esencial para el ser humano, su ingesta excesiva provoca toxicidad para el hombre, siendo genotóxico y generando la *enfermedad de Keshan*. Algunos de sus compuestos son cancerígenos para el hombre.

12.-Compuestos orgánicos

Las materias orgánicas que puede contener un agua son muy numerosas y variadas habiéndose aislado más de 1.000 compuestos orgánicos diferentes en un agua mediante técnicas de alto poder de separación. En nuestro país, estudios recientes

demuestran la identificación de más de 200 compuestos diferentes en aguas de distintos orígenes. Entre estos compuestos cabe citar halogenados, hidrocarburos aromáticos, aminas y amidas, derivados fenólicos, alcoholes, plastificantes, etc...

El origen de los *orgánicos* de un agua, evidentemente, puede ser doble: natural y artificial (antropogénico). En el primer apartado se incluyen los compuestos *desecho* de actividades vitales de organismos hídricos y no hídricos (productores de olores y sabores en un agua). Además, han de citarse las *sustancias o compuestos húmicos*, que provienen de la descomposición de restos vegetales en medios hídricos (o de la polimerización de compuestos más simples).

Grupo de compuestos	Sustancia concreta
<i>Halogenados</i>	Cloroformo Tetracloruro de carbono 3-cloropiridina ácido 6-clororopicolínico
<i>Hidrocarburos Aromáticos</i>	Tolueno Xilenos Naftaleno Bifenilos Fenantreno
<i>Acidos</i>	Propiónico Butírico Benzóico Fenilacético Oléico, esteárico, palmítico
<i>Alcoholes</i>	Alcohol bencílico Fenoles Alfa-Terpineol
<i>Cetonas y Aldehidos</i>	Benzofenona, benzaldehido Cuminaldehido
<i>Pesticidas y Herbicidas</i>	Atrazina Simazina Lindano Aldrín
<i>Aminas y Amidas</i>	3-nitroanilina N,N'-dietil-nicotinamida 3-metilpiridina 2,4-dimetilpiridina
<i>Detergentes</i>	Poliethylénglicoles Alquilfenoles polietoxilados Alcoholes polietoxilados Sulfatos de alquiléter
<i>Otros compuestos</i>	Benzofurazano Benzofuroxano Benzoditiazol Oxido de nicotina Aminopiridina

Respecto a las sustancias antropogénicas pueden subdividirse entre materias puramente biológicas resultantes del metabolismo humano (o excretas orgánicas) y sustancias orgánicas de síntesis mucho más contaminantes: plaguicidas, insecticidas, fungicidas, residuos de industrias (químicas, farmacéuticas, petroquímicas, metalúrgicas, etc..). Menciónense, asimismo, los productos resultantes en mayor o menor medida del tratamiento y depuración de un agua (por ejemplo, trihalometanos).

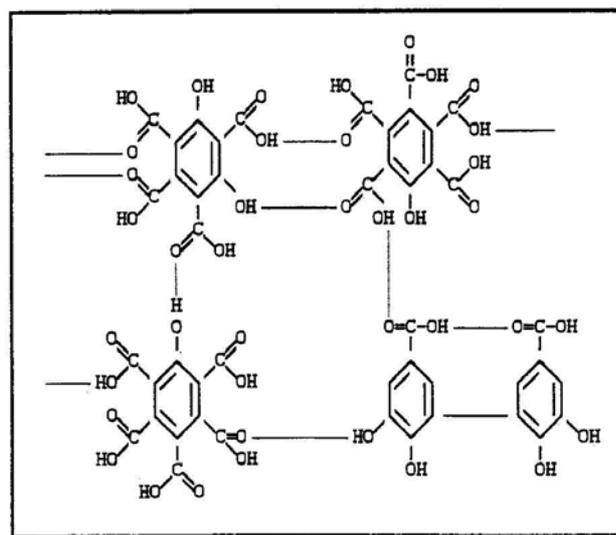
Así, un agua natural no contaminada contendrá especialmente, metabolitos

producidos por algas, bacterias, etc... y sustancias húmicas, mientras un agua residual tendrá detergentes, grasas y restos de materias puramente orgánicas, fibras, así como pesticidas, insecticidas, fenoles, hidrocarburos variados, etc...

Sustancias húmicas (SH)

Pueden dividirse en dos grupos: compuestos álcali solubles o álcali insolubles. Correspondientes al primer grupo se incluyen ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y ácido himatomelánico, mientras en el segundo grupo se encuentra el carbón húmico de carácter esencialmente más inorgánico que los anteriores.

La estructura de las SH ha sido muy estudiada: se trata de polímeros aromáticos con alta proporción de grupos $-OH$ y $-COOH$, y alta estabilidad en el agua tanto frente a procesos de tratamiento oxidativos como de coagulación.



(—)enlaces por puentes de H

Figura 7.- Estructura de sustancia húmica: ácido fúlvico.

La importancia de las sustancias húmicas es doble: por una parte actúan de precursores en la formación de trihalometanos, sustancias tóxicas indeseables generadas por su cloración, y por otra, dada su elevada estabilidad que las mantiene en suspensión confieren a un agua turbidez y color. Además, dado su alto poder de adsorción complejan muchos metales y otras sustancias presentes en aguas dificultando su eliminación posterior en el tratamiento.

Fenoles

Son compuestos derivados del benceno por sustitución de átomos de hidrógeno por grupos hidroxilo. Derivados del propio fenol C_6H_5-OH , deben destacarse los cresoles o metilfenoles ($CH_3-C_6H_4-OH$) y los tres difenoles isómeros pirocatequina, resorcina e hidroquinona, de fórmula general $[C_6H_4(OH)_2]$, así como compuestos fenólicos clorados formados por cloración de fenoles originalmente presentes en aguas brutas: el 2-cloro fenol, el 4-cloro fenol, el 2,4-dicloro fenol 2,4-D) y el 2,4,6-tricloro fenol.

En general, los fenoles no son sustancias habituales en aguas naturales salvo en las que atraviesan zonas de turberas y son ricas en materias húmicas. Su procedencia está ligada a efluentes industriales procedentes de pasta de papel, minería, refineries de

petróleo, alpechines, industrias químicas y farmacéuticas, así como a su uso en revestimientos y pinturas bituminosas.

Toxicológicamente, niveles de 1 mg/L de fenoles en aguas naturales resultan tóxicos para los peces, mientras que concentraciones menores afectan a otros organismos acuáticos, como moluscos, algas, protozoos, bacterias, con lo que el poder autodepurador del cauce de agua disminuirá de una forma muy sensible. En general, los compuestos fenólicos pese a su poder bactericida y bacteriostático pueden degradarse por diversos microorganismos presentes en aguas naturales.

Trihalometanos

Compuestos monocarbonados con sustituyentes halogenados, su descubrimiento sobre 1.970 dio lugar a una importante serie de investigaciones alternativas sobre su generación en el agua, y acerca de su incidencia en el ser humano. Se producen por cloración de otros compuestos orgánicos "*precursores*", del tipo de sustancias húmicas e incluso algas, presentes en las aguas brutas sometidas a potabilización.

Un agua rica en *precursores* de THM (sustancias polifenólicas) sometida a cloración experimenta una compleja serie de reacciones químicas conducentes a la rotura de los anillos aromáticos y a generar compuestos monocarbonados y dicarbonados simples con sustituyentes halogenados, en especial, cloro, bromo y yodo. Además, incrementos del pH del agua, de temperatura, de contenidos en bromuros y ioduros y de las dosis de cloro aplicadas en la potabilización conducen a la generación de cantidades importantes de THM en el agua tratada. El empleo de otros oxidantes como ozono, dióxido de cloro y cloraminas da lugar a una menor tasa de generación de estas sustancias en el agua tratada.

Los THMs más frecuentes en aguas de bebida son cloroformo, diclorobromometano, dibromoclorometano y bromoformo siguiendo su proporción relativa el orden de cita anterior. Recientemente, se han encontrado otros compuestos halogenados con 2 átomos de C, si bien con una incidencia mínima. Las concentraciones totales de los cuatro THMs más frecuentes no suelen superar 1,00 mg/L, estando normalmente alrededor o por debajo de 100 µg/L, siendo más altos en aguas superficiales de ríos con cierta contaminación, salinas y con altos contenidos en cloruros y bromuros. Los THMs son depresores del sistema nervioso central y pueden afectar negativamente las funciones hepáticas y renales. El consumo de aguas con altos contenido en THMs puede correlacionarse positivamente con una mayor incidencia en la aparición de episodios de cáncer hepático siendo el efecto más negativo el provocado por los THMs bromados frente a los clorados. Sin embargo, los niveles muy bajos encontrados en aguas de consumo descartan la anterior correlación.

Insecticidas, herbicidas

Se trata de compuestos orgánicos o inorgánicos que se utilizan para luchar contra los parásitos de los cultivos, del ganado, de los animales domésticos y del hombre y su ambiente, pudiendo clasificarse en: insecticidas, herbicidas, acaricidas, fungicidas, antibióticos y rodenticidas. Además, pueden considerarse como plaguicidas a los atrayentes, repelentes y esterilizantes de insectos.

El producto activo de un plaguicida suele tener una riqueza comprendida entre el 75% y el 98%, siendo el resto productos secundarios e impurezas de fabricación. Características típicas de cualquier plaguicida son: (*a*)*toxicidad*, mucho más baja para los

organismos superiores que para los organismos a eliminar debido a la mayor complejidad metabólica de los primeros; (b) elevada resistencia a la *degradación* o *persistencia*; (c) su carácter *acumulativo*, lo que posibilita su toxicidad diferida potenciada a través de su ascenso en la cadena trófica. Como ejemplo, sirva el dato de que después de varios años de no utilizar habitualmente DDT en cultivos de varios países europeos y en EEUU, todavía se lo puede encontrar en suelos y aguas subterráneas de estas zonas.

Otro aspecto negativo relativo de los plaguicidas en aguas es su acusado carácter organoléptico. Concentraciones, en muchos casos, de sólo pocos $\mu\text{g/L}$ son capaces de propiciar la aparición de olores y sabores en un agua. Los principales plaguicidas más usados en la actualidad son insecticidas y dentro de estos los siguientes grupos:

(1) Organoclorados: Aldrín, 2,4-D, DDT, Dieldrín, clordano, endrín, heptacloro, HHDN, Lindano, metoxicloro, 2,4-5-T y tetradifón, como más importantes.

(2) Organofosforados: Azinfosmetil, diazinon, fentiión, fosdrín, malatión, paratión, sintox y TEPP, especialmente.

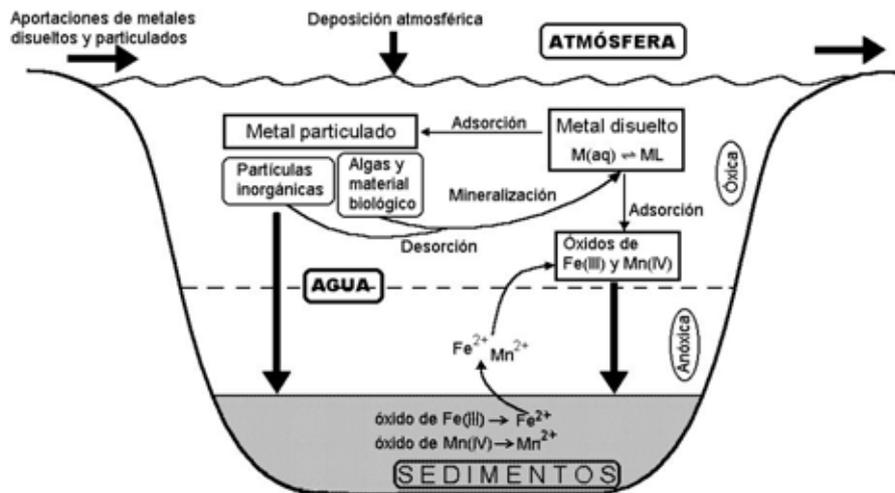
(3) Carbamatos: Carbaryl, zectrán, temik, undén.

La toxicidad de un pesticida es función del tipo de compuesto y de su concentración, siendo los insecticidas organoclorados más tóxicos para los peces que los organofosforados en un factor de 100 y estos lo son más que los herbicidas en un factor de 1.000. Con respecto al hombre y mamíferos, la toxicidad de los insecticidas organofosforados es superior a la de los organoclorados, pero al ser más degradables, su potencia tóxica es menor.

Compuestos emergentes

Podemos hablar aquí de las diferentes sustancias como antibióticos, reguladores hormonales, productos cosméticos, restos de piensos de engorde de animales, etc., cada vez más empleados por el hombre, que habitualmente se acumulan en los tejidos grasos y que son capaces de producir potencialmente diversos tipos de cánceres, problemas cardiovasculares y otros en el ser humano. Recientemente, la Unión Europea ha elaborado Directivas sobre sustancias prioritarias en contaminación de cauces públicos que se ocupan de este tema.

Para finalizar este apartado, se presenta en figura adjunta la dinámica general que experimentan en un agua los compuestos químicos traza en general.



13.-Microorganismos de las aguas

Antes de comenzar este apartado, conviene repasar la clasificación de los organismos en función de su tipología nutricional:

- Organismos Fotoautótrofos: usan la luz como fuente energética, y el CO₂ como fuente de carbono.
- Organismos Fotoheterótrofos: usan la luz como fuente energética, y varias fuentes de carbono orgánico como fuente de carbono.
- Organismos Quimioautótrofos: usan compuestos químicos como fuente energética, y el CO₂ como fuente de carbono.
- Organismos Quimioheterótrofos: usan compuestos químicos como fuente energética, y varias fuentes de carbono orgánico como fuente de carbono.

Dicho esto, los microorganismos más numerosos que puede albergar una masa de agua son: bacterias, cianofíceas, hongos, protozoos, algas y virus.

13.1.-Algas fitoplanctónicas

Características Generales

Al conjunto de microorganismos que flotan en un agua natural se denomina plancton, que se divide en zooplancton (plancton animal) y fitoplancton (plancton vegetal). Las especies planctónicas poseen un tamaño que oscila entre algunos mm y 20 μm. Se definen las *algas* como organismos que realizan la fotosíntesis desprendiendo oxígeno, y que poseen *cloroplastos*. Pueden ser unicelulares o pluricelulares, filamentosas algunas o formadoras de colonias otras.

La clasificación de las algas está basada en sus propiedades celulares: naturaleza química de la pared celular, materiales orgánicos de reserva producidos, tipo de pigmentos fotosintéticos y existencia y tipo de flagelos. Un grupo extenso de algas son los llamados *flagelados fotosintéticos*, es decir, algas con flagelos, p.e. el grupo *Euglenophyta*. Estas algas poseen una mancha ocular rojiza y una película elástica que rodea a la pared

celular que les permite adoptar cambios de forma. Se reproducen por fisión longitudinal en varias unidades. Las algas multicelulares son inmóviles en estado maduro, mientras que cuando se reproducen mediante células sexuales (*gametos*) o asexuales (*zoosporas*) éstas sí son móviles.

Respecto a las algas no flageladas, los grupos principales son *Desmidiáceas* y *Diatomeas*, con formas aplastadas y grandes, y presentando reproducción mediante fisión ecuatorial. Aunque no poseen flagelos pueden desplazarse sobre sustratos sólidos a través de movimientos tipo ameboide. Además, las diatomeas poseen una hendidura longitudinal en su pared celular o *rafe* que les permite contactar con el medio exterior.

Finalmente, existe otro grupo de algas denominadas *Leucofitos* que han perdido la capacidad para ser fotosintéticas. Estas algas están distribuidas por todos los grupos principales de algas existentes. No poseen cloroplastos o si los tienen no están pigmentados. Dada esta particularidad los leucofitos pueden ser incluidos bien como algas o como protozoos.

Tipos de Algas principales en aguas

En aguas de superficie de países templados, las algas están prácticamente ausentes durante el invierno desarrollándose en los períodos cálidos de mayor temperatura e iluminación del agua, a través de típicas explosiones de crecimiento o "bloom". Siguen, en general, la secuencia generacional de diatomeas (primavera), clorofitas (verano) y cianofíceas (otoño). Las algas fitoplanctónicas son autótrofas, unicelulares o coloniales, móviles y flageladas, o bien inmóviles. La clasificación de las algas se basa en primer lugar en sus pigmentos (almacenados en los cloroplastos) y morfología, y en segundo lugar en las sustancias de reserva que poseen y el tipo de aparato. Los pigmentos fotosintéticos están albergados en cloroplastos. Podemos distinguir cuatro ramas típicas de interés en aguas: Clorofitas, Euglenofitas, Crisofitas y Dinofíceas. Comentémoslas brevemente:

(a)Clorofitas

Con plastos de color verde puro y diferentes formas. Como sustancia de reserva contienen almidón, y las fases móviles están dotadas en general, de dos flagelos iguales. Los órdenes más habituales son:

- Volvocales*: *Chlamydomonas*, *Gonium sociale*, o *Pandorina*.
- Clorococcales*: *Pediastrum* y *Scenedesmus*.
- Ulotricales*: *Ulothrix* y *Horidium*.
- Cladoforales*.
- Conjugales*: Cignemáceas (p.e., *Spirogyra* y *Zygnema*) y Desmidiáles (*Closterium*).

Otros órdenes menos importantes son: *Edogoniales*, *Quetoforales* y *Tetrasporales*.

(b)Euglenofitas

Organismos unicelulares flagelados, que albergan en su interior plastos de color verde: estos contienen paramilón acumulado en forma de bastoncillos. Los principales órdenes se hallan en aguas ricas en materias orgánicas: por ejemplo, *Euglena* y *Facus*.

(c)Crisofitas

Comprende grupos algales caracterizados por no poseer almidón como sustancia

de reserva. Sus plastos son de color amarillo verdoso, amarillo o marrón y elaboran leucosina o crisosa y diferentes tipos de aceites vegetales. Su principal dato distintivo es el poseer silicio en su estructura celular:

- Diatomeas*.
- Centrales*: *Melosira*, *Cyclotella* y *Stephanodiscus*.
- Pennales*: *Asterionella*, *Fragilaria*, *Synedra*, *Navícula*.
- Crisofíceas* (de aguas frías).
- Xantofíceas*.

(d) *Dinofíceas*

Algas planctónicas unicelulares, con numerosos plastos de color marrón, estando recubierta su membrana externa por placas de celulosa. Suelen ser algas móviles. El género más importante es *Ceratium*.

13.2.-Cianofíceas

Microorganismos procariotas, poseen diferentes pigmentos para realizar la fotosíntesis: clorofila α , β -caroteno y ficobilinas. De color azulado característico, se diferencian tanto de las algas verdaderas como del resto de las bacterias por sus pigmentos: las algas tienen clorofilas y las cianofíceas, bacterioclorofilas especiales. Presentan las cianofíceas morfologías muy variadas pudiendo encontrarse colonias esféricas, ovoides o en placa, a menudo rodeadas de envolturas mucosas (Croococales). También existen cianofíceas filiformes y filamentosas.

Se multiplican por división celular y pueden formar esporos y heterocistos gruesos nodulares, como forma de resistencia ante un ambiente hostil. Estos microorganismos juegan papel relevante en los fenómenos biológicos de las aguas superficiales, creciendo en forma libre o fijadas sobre sustratos, animales y/o plantas y existiendo variedades fotosintéticas y heterotróficas (Hormogonales); éstas últimas también efectúan la fijación del N_2 atmosférico. Para finalizar este breve repaso a sus características principales, si bien las cianofíceas prefieren aguas alcalinas, hay otras que viven en aguas ácidas; además, las formas planctónicas (con vacuolas de aire para flotar) pueden provocar "blooms" de crecimiento donde lugar a las "flores de agua".

(1) *Cianofíceas de las aguas continentales*

Debido a su carácter fotosintético, no se suelen encontrar en las aguas subterráneas, pero sí en manantiales. Son muy frecuentes en fuentes termales con aguas de $pH > 5$ y temperatura menor de $74^\circ C$. En estos hábitats suele confirmarse la presencia entre otros, de los géneros *Aphanocapsa*, *Pleurocapsa*, *Oscillatoria* y *Spirulina*.

Las aguas calentadas por el sol temporalmente, suelen ser ricas en cianofíceas que generan en estos lugares las denominadas "rayas de tinta" especialmente frecuentes en las rocas de alta montaña por las que discurren arroyos, o incluso en aguas poco profundas de desiertos.

En los ríos se encuentran más algas que cianofíceas y dentro de éstas los géneros *Pleurocapsa*, *Hydrococcus* y *Chamaesiphon* sobre musgos y algas. En los ríos caudalosos suelen abundar las formas cianofíceas planctónicas de los géneros *Aphanizomenon* y *Mycrocystis aeruginosa*.

En lagos se conocen varios cientos de especies, mayoritariamente planctónicas,

tanto de cianofíceas Croococales como Hormogonales. Las más frecuentemente halladas son de los géneros *Microcystis* y *Synechococcus* (Chroococales), y *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Aphanizomenon* y *Oscillatoria* (Hormogonales) entre otras.

Croococales	
Células aisladas o colonias, reproducción por división celular y esporos	
<u>Chroococcales</u>	Células aisladas, colonias <i>Aphanothece</i> , <i>Chroococcus</i> , <i>Merismopedia</i> , <i>Microcystis</i> , <i>Synechococcus</i>
<u>Chamaesiphonales</u>	Células aisladas fijas, exosporas <i>Chamaesiphon</i>
<u>Pleurocapsales</u>	Agrupaciones celulares filiformes, endosporas <i>Hydrococcus</i> , <i>Pleurocapsa</i>
Hormogonales	
Filamentos de células con diferenciaciones celulares (tricomas), reproducción por hormogonios	
<u>Oscillatoriales</u>	Filamentos sin heterocistos <i>Lyngbya</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Phormidium</i> , <i>Spirulina</i> , <i>Trichodesmium</i>
<u>Nostocales</u>	Filamentos con heterocistos <i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Gloetrichia</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Rivularia</i>
<u>Stigonematales</u>	Filamentos con ramificaciones verdaderas <i>Mastigocladus</i> , <i>Stigonema</i>

Las Chroococales presentan especies que viven como células aisladas (*Synechococcus*) y otras formadoras de colonias (*Microcystis* o *Aphanothece*). En lagunas pequeñas y riberas de lagos existen cianofíceas que viven fijas a la tierra, por ejemplo los géneros *Rivularia* y *Gloetrichia* que se acumula en depósitos calizos. En lugares pantanosos se han hallado *Synechococcus*, *Chroococcus*, *Anabaena* y *Hapalosiphon*.

Las formas halófilas se suelen encontrar en lagos salados. Aquí se suelen formar flores de agua promovidos por *Aphanizomenon*, *Gomphosphaeria*, *Merismopedia* y otras. Incluso, en los lagos muy salados del Oriente Medio (hasta 180 g/L de sales) se han hallado cianofíceas chroococales y hormogonales, destacando *Microcoley chtonoplastes* que vive en ambientes muy ricos en H₂S.

(b) *Cianofíceas del mar*

Emparentadas con las de agua dulce, su presencia en el mar es menor que la correspondiente en ríos y lagos. Sólo existen algunos géneros genuinamente marinos como *Trichodesmium* y *Dermocarpa*. Las cianofíceas marinas no desempeñan un papel tan importante como las de las aguas dulces, excepto en los mares polares.

En el plancton existen los géneros *Trichodesmium*, *Oscillatoria* y *Katagnymene*, entre otros. Las productoras de filamentos forman flores de agua especialmente en mares tropicales. Además, en casi todos los mares y océanos viven cianofíceas chroococcales como *Synechococcus*, *Nostoc* y *Dactylococcopsis*. En zonas costeras intermareales y lodosas viven cianofíceas fijas a las plantas, rocas e incluso al fondo marino. En las zonas de salpicadura de las costas rocosas es característica la flora de cianofíceas, de los géneros *Calothrix*, *Nodularia*, *Oscillatoria* y *Lyngbya*, sobre todo. Finalmente, los litorales calcáreos suelen ser ricos en los géneros *Entophysalis*, *Hormatonema* y *Scopulonema*.

13.3.-Bacterias

Características Generales

Incluidas en el Reino MONERAS, la clasificación de las bacterias se realiza modernamente atendiendo a criterios de composición de su ADN, o por morfología y es susceptible de periódica modificación.

Las bacterias son más pequeños que los organismos eucariotas pero mayores que los virus. En función de la naturaleza y tipo de la pared celular se pueden agrupar en tres grandes divisiones: *micoplasmas*, que no sintetizan una pared celular y sólo tienen membrana celular; *bacterias Gram-positivas*, que sintetizan una pared celular de una capa; *bacterias Gram-negativas* que poseen una pared celular con al menos dos capas estructuralmente distintas. Para clasificar las bacterias como Gram-positivas o negativas se usa un tipo de tinción especial, la tinción de GRAM que sirve para poner de manifiesto la estructura de la pared celular.

Los MICOPLASMAS son organismos deformables y frágiles, por la ausencia de pared celular. Suelen ser contaminantes habituales de cultivos de tejidos, además de haberse encontrado en otros medios libres (aguas). Sus células pueden ser redondeadas o alargadas e irregulares, o bien filamentosas. Pueden ser móviles o inmóviles. Son los microorganismos más pequeños observables al microscopio óptico. En general son insensibles a las *penicilinas* al no tener pared celular que contendría *peptidoglucano* atacado por el antibiótico.

Las BACTERIAS GRAM-POSITIVAS son en general quimioheterótrofos, aerobios o anaerobios (fermentadores). Se suelen subdividir en función de que sean unicelulares o que formen micelios en su crecimiento, y pueden presentar forma esférica (*cocos*) o alargada (*bacilos*). En algunos casos forman endosporas muy resistentes al calor, la radiación y a los agentes tóxicos, como forma de reproducción.

Por otro lado, muchas BACTERIAS GRAM-POSITIVAS unicelulares pueden ser inmóviles y otras móviles mediante flagelos. Además, otras pueden formar células de diferente forma y tamaño (p.e., *Arthrobacter*).

Ciertos grupos de bacterias Gram-negativas (*espiroquetas*) se mueven mediante "natación" promovida por sistemas de fibrillas axiales estrechamente enroscadas a la célula bacilar y encerradas por la propia pared celular. Finalmente, otras bacterias de este tipo se mueven por deslizamiento, poseyendo la característica común de formar colonias planas que se extienden mucho sobre un medio sólido: su deslizamiento se descubre por dejar rastros mucosos del mismo.

Bacterias de las aguas

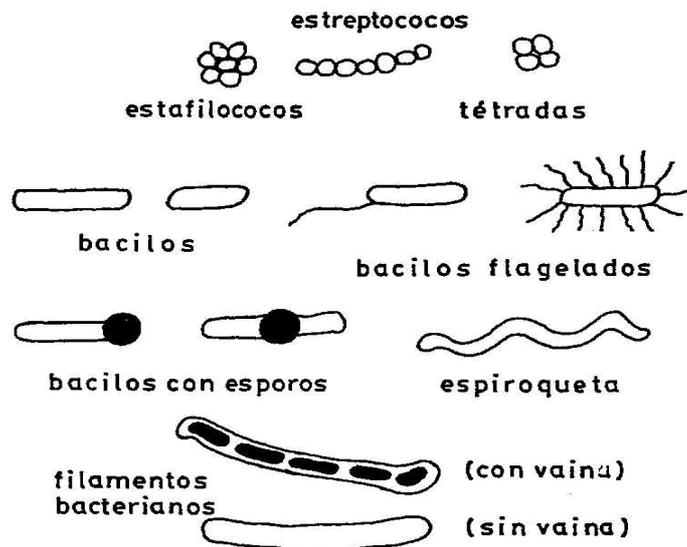
La flora bacteriana de un agua la conforman dos grupos típicos: (a) bacterias autóctonas, con hábitat en el agua y que sólo pueden desarrollarse óptimamente aquí, y (b) bacterias procedentes de otros biótopos, especialmente bacterias procedentes de la tierra y del aire. Todas estas bacterias ocasionales sólo permanecen vivas en el agua un tiempo limitado, que si se dilata las convierte en organismos facultativos de las aguas.

El contenido bacteriano es muy variable dependiendo del tipo de agua, concentración de sales inorgánicas y sustancias orgánicas, enturbiamiento, iluminación y temperatura. En este sentido, las bacterias marinas son diferentes de las de las aguas dulces, y a su vez, las de los ríos suelen ser distintas a las de los medios lacustres. Fundamentalmente organismos "C-heterótrofos" pueden presentar formas variadas siendo la mayor parte móviles y flageladas y reptando o deslizándose sobre sustratos sólidos (detritos o algas, principalmente) las restantes. Se han llegado a describir unos 16 grupos de bacterias tanto estrictas como facultativas de los medios hídricos.

(1) Bacterias de las aguas continentales

La mayor parte de las bacterias de las aguas subterráneas, manantiales y arroyos también viven en el suelo. No obstante, dado que el agua subterránea es pobre en sustancias nutritivas a consecuencia de la filtración que sufre a través de las distintas capas de un suelo, su contenido bacteriano, salvo contaminación, no es alto.

De cualquier forma, suelen encontrarse allí bacilos no esporulados de los géneros *Achromobacter* y *Flavobacterium*, así como bacilos Gram-positivos y microorganismos de los géneros *Micrococcus*, *Nocardia* y otros. También se han encontrado en diferentes aguas subterráneas representantes de los géneros *Microcylus*, *Hyphomicrobium*, y *Clostridium*. En aguas subterráneas procedentes de los pozos petrolíferos es frecuente hallar bacterias con capacidad de desdoblar hidrocarburos.



En los manantiales, además de las bacterias anteriores, y dado su mayor riqueza en nutrientes, viven mayor variedad de géneros: por ejemplo, en aguas ferrosas pueden existir bacterias del hierro (*Leptothrix ochracea* y *Crenothrix polyspora*).

En los arroyos pobres en sustancias nutritivas, suelen predominar los bacilos Gram-negativas no esporulados, pudiendo hallarse bacterias pediculadas así como *Pseudomonas*. Cuando aumenta el contenido nutricional, se incrementa la proporción de *Pseudomonáceas* disminuyendo la de *Flavobacterium* y *Achromobacter* y haciéndose mayoritarias las enterobacterias.

El número de bacterias de la tierra presentes en ríos es alto encontrándose el género *Azotobacter* y azotobacterias del tipo *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. En aguas fluviales más contaminadas también pueden aislarse frecuentemente vibriones, espirilos, tiobacilos, micrococos, sarcinas, nocardias, estreptomicetos, citófagos y espiroquetas, así como las bacterias típicas de las aguas residuales en función del grado de contaminación: *Escherichia coli* y las denominadas coliformes, salmonellas y estreptococos fecales. También, en cauces de alta contaminación pero oxigenados viven *Proteus vulgaris* y *Clostridium* libres o sus esporas. Por contra, en aguas mal oxigenadas sobre sedimentos, se hallan *Desulfovibrio desulfuricans* y *Sphaerotilus natans*, así como colonias fibrosas de *Zoogloea ramigera* en ríos con contaminaciones por industrias papeleras.

En los lagos el contenido y dinámica bacteriana estará determinada por el emisario que alimente el lago cuya flora bacteriana podrá encontrarse en aquél; los lagos superficiales tienen un contenido microbiano más variado y rico que los subterráneos, variando estacionalmente y en función de su ubicación geográfica. El contenido en bacterias fotoautótrofas será más alto en la medida que el lago esté *menos contaminado orgánicamente*. Además, en aguas profundas de estos lagos se encuentran bacterias cromatíaceas como *Thiopedia rosea* así como clorobiáceas.

En los lagos de aguas saladas existen organismos halófilos, pudiendo destacarse especies halófilas extremas, que viven con concentraciones de sal de hasta el 30% y pertenecen a los géneros *Halobacterium* y *Halococcus*. Su extensión (o *bloom*) provoca una coloración rojiza en estos lagos. Bacterias moderadamente halófilas son, por ejemplo, las *Chromobacterium marismortui* (típicas del Mar Muerto en Oriente Medio).

(2) Bacterias del mar

Aquí se desarrollan microorganismos halófilos adaptados a la vida en aguas que contienen entre 25 y 40 g/L de cloruro sódico. La mayoría son bacterias gram-negativas, móviles y flageladas, encontrándose muy poca proporción de microorganismos esporulados. Además, suele tratarse de anaerobios facultativos, más adaptados a la vida en presencia que en ausencia de oxígeno.

De crecimiento más lento que el de las bacterias terrestres, pueden responder a varios tipos morfológicos (cocos, bacilos, vibriones y espirilos), su temperatura óptima de crecimiento es de unos 20 °C. Por otro lado, en aguas abisales (a unas 100 atm de presión) se han observado bacterias barófilas y barotolerantes. En aguas poco oxigenadas medran bacterias desnitrificantes y desulfurantes (del género *Desulfovibrio* mayoritariamente). La proporción de bacterias proteolíticas parece ser mayor en el medio marino que en las aguas dulces, existiendo microorganismos con capacidad para usar como alimento cualquier sustancia del agua: azúcares, grasas, celulosa, alginatos, quitina, hidrocarburos, fenoles, etc.

Las bacterias marinas pueden ser "eubacterias" sobre todo, pero existen otros tipos como las vaginadas (*Phragmidiothrix*), pediculadas (*Hyphomicrobium*), espiroquetas, actinomicetos (*Nocardia*, *Streptomyces*) y reptantes (*Cytophaga*, *Thiothrix*). Otras

bacterias marinas son bioluminiscentes, viviendo libres o fijas sobre los órganos luminosos de cefalópodos y peces de abisales (géneros *Aeromonas* y *Vibrio*).

En el agua marina y en algunos sedimentos marinos abundan extraordinariamente las bacterias pigmentadas (C-heterótrofas, fotoautótrofas o quimioautótrofas). Las especies del género *Thiobacillus* se han encontrado tanto en zonas marinas profundas como en charcas litorales. Además, es frecuente detectar nitrobacterias (*Nitrosococcus oceanus*), siderobacterias y manganobacterias (que oxidan el Fe^{2+} a Fe^{3+} y Mn^{2+} a Mn^{4+}). Finalmente, en zonas de aguas salobres existen tanto bacterias marinas autóctonas como otras halotolerantes o halófilas: p.e. géneros *Agrobacterium* y sulfobacterias púrpura.

13.4.-Hongos

Características Generales

Son organismos no fotosintéticos eucariotas, que tienen una estructura vegetativa expansiva denominada "*micelio*". El micelio es una masa citoplasmática multinucleada encerrada dentro de un sistema de tubos rígidos y ramificados de diámetro generalmente uniforme, que surge de una sola célula o espora, que al germinar da lugar a un largo filamento denominada "*hifa*". El micelio puede crecer indefinidamente alcanzando dimensiones macroscópicas.

Dado que los hongos son inmóviles obtienen su energía por respiración o fermentación a partir de materiales orgánicos solubles presentes en sus hábitats. Algunos hongos desarrollan hifas especializadas para atrapar protozoos y pequeños invertebrados que les sirven de alimento: una vez muerta la presa, las hifas crecen dentro de ella y absorben los nutrientes contenidos en la presa.

La reproducción de los hongos es compleja: alterna una fase de desarrollo de una célula asexual o *zoospora* que crece liberando más zoosporas, con otra fase de formación de células sexuales diferenciadas que forman un *zigoto*. Éste se desarrolla generando hifas que a su vez forman esporas asexuadas cuyo desarrollo daría lugar a células sexuales diferenciadas.

Los hongos se dividen en *Phycomycetes* u *Hongos Inferiores* y dos grupos de *Hongos Superiores*: *Ascomycetes* y *Basidiomycetes*. Las diferencias entre hongos superiores e inferiores radican en que en los inferiores las esporas que se forman siempre son endógenas y se generan dentro de una estructura particular con forma de saco denominada *zoosporangio* o *esporangio*. Además, en los *Phycomycetes* el micelio no presenta tabiques transversales internos salvo cuando se forman esporangios, por lo que se denomina *micelio no septado*. Las diferencias entre *Ascomycetes* y *Basidiomycetes*, ambos hongos tabicados y con esporas sexuales exógenas se hallan en su desarrollo sexual: en un caso las esporas se forman dentro o sobre estructuras denominadas *ascas* y en el segundo sobre *basidios*.

Respecto a las *levaduras* digamos que se trata de hongos superiores que han perdido su capacidad de generar micelios y se desarrollan como organismos unicelulares. Las levaduras se multiplican por gemación. En un cierto estado de crecimiento, cesa la gemación y las células vegetativas se transforman en *ascas* o *basidios*, conteniendo cada una varias esporas.

		Reproducción	
		vegetativa	generativa
Mastigomycotina			
<i>Chytridiomycetes</i>			
Chytridiales] Zoospora monoflagelada]	(-)	
Blastocladales			
Monoblepharidales			
<i>Hyphochytridiomycetes</i> (-)			
<i>Oomycetes</i>			
Lagenidiales] Zoospora biflagelada]	(+) (+)	
Saprolegniales			
Leptomitales			
Peronosporales			
Zygomycotina			
<i>Zygomycetes</i>			
Mucorales] Conidios]	(+) (+)	
Entomophthorales			
<i>Trichomycetes</i>] Mixamebas]		

La mayoría de estos hongos se han adaptado a la vida en medios ricos en azúcares y realizan fermentaciones de aprovechamiento industrial para el hombre: fabricación de yogurs, cervezas, pan...

Por último, hablemos de los denominados "*hongos mucosos*" que no son hongos verdaderos y suelen crecer sobre troncos en descomposición. Forman estructuras multinucleadas denominadas *plasmidios* que se desplazan en forma ameboide sobre el substrato en que se forma, ingiriendo microorganismos más pequeños y fragmentos vegetales en descomposición.

Hongos de las aguas

Los hongos de las aguas pueden ser saprofitos, parásitos (que atacan a muchas variedades de plantas y animales, permanente u ocasionalmente) o depredadores de protozoos, rotíferos o nemátodos. La mayoría de los hongos acuáticos necesitan N₂ libre, pudiendo degradar proteínas, azúcares, almidón, grasas, pectina, celulosas, lignina, etc..

Hay hongos que soportan amplios rangos de pH (3,2-9,6) como la especie *Achlya racemosa*, mientras que otros requieren un estrecho margen de pH (1,9-2,9), como los hongos de los lagos volcánicos de Japón.

Los hongos acuáticos (unicelulares o pluricelulares) corresponden a tres grupos principales: Mixomicetos (labirintulados y mixomicetos parásitos), Hongos superiores (ascomicetos, basidiomicetos y deuteromicetos) y Hongos inferiores o ficomicetos, siendo estos últimos, en realidad, los hongos acuáticos propiamente dichos (ver tabla de su

clasificación más arriba).

El hábitat colonizador de los hongos se extiende por sedimentos, seres vivos, material orgánico detrítico, mientras sus zoosporas medran libres. Existen hongos terrestres y acuáticos a la vez (que pueden formar zoosporas o conidios). Los estrictamente acuáticos se suelen fijar a algas planctónicas.

Entre los hongos superiores de las aguas, se detectan mayoritariamente Ascomicetos y Deuteromicetos, siendo minoritarios los Basidiomicetos. Sólo las levaduras y los hongos levaduriformes pueden medrar libremente en el agua requiriendo los demás fijarse a un sustrato.

(1) Hongos de las aguas continentales

Poco frecuentes en aguas subterráneas, manantiales y arroyos puros, en arroyos pobres en nutrientes y materia orgánica se encuentran sobre ramas sumergidas especies del género *Sapromyces* (Leptomitales); en aguas residuales presenta un gran desarrollo el *Leptomitus lacteus*, del mismo orden anterior.

En los ríos abundan los ficomicetos (Chytridiales) parásitos depredadores de algas planctónicas, pequeños animales, huevos y larvas de cangrejos y peces. Otros hongos que se asientan sobre organismos hospedadores en corrientes fluviales pertenecen a especies de los géneros *Olipidium*, *Polyphagus* y *Chytridium*, pudiendo además, ser parásitos de otros Ficomicetos. También frecuentes en los ríos son hongos más desarrollados del orden de los Saprolegniales. De cualquier forma, la mayor parte de las especies fluviales son saprofitas, por ejemplo, el género *Pythium* (Peronosporales). En muchas aguas corrientes existen también levaduras, muy numerosas en ríos contaminados por aguas residuales donde además se desarrollan Ascomicetos superiores y Deuteromicetos, abundantes en maderas y material vegetal.

En los lagos existen Ficomicetos tanto saprofitos como parásitos (por ejemplo, géneros *Olipidium* y *Ancylistes*, muy extendidos en pantanos y lagos poco contaminados). También es frecuente la especie *Rhizophyidium pollinis-pinis*, que vive en granos de polen sumergidos, así como la especie *Polyphagus euglenae*, ésta en lagos oligotróficos (poco contaminados). Hongo también encontrado en lagos y ríos, es el *Zoophagus insidians* que se fija sobre algas verdes filamentosas y se alimenta de rotíferos, a los que se fija mediante la secreción de una sustancia pegajosa.

En los lagos pequeños con importante cantidad de acumulación de restos vegetales se encuentran varios géneros, *Anquillospora*, *Dendrospora* y *Clavariopsis*, entre otros. En sedimentos de aguas continentales existen especies del género *Arthrobotrys*, por otro lado frecuentes en la tierra. También merece destacarse la presencia ocasional en aguas dulces de hongos procedentes del suelo (géneros *Penicillium* y *Aspergillus*) cuyas esporas pueden germinar sobre restos vegetales.

En lagos salados, pero poco salinos, viven muchos hongos típicos de medios marinos. Así por ejemplo, la especie *Rhizophyidium halophilum*. Por contra, no existen datos sobre la presencia de hongos en lagos de elevada salinidad.

(2) Hongos marinos

Existen representantes de todos los grupos de hongos en el mar, comprobándose que una alta proporción requiere vivir en ambientes ricos en NaCl. Además de estos hongos halófilos existen otros halotolerantes procedentes de aguas dulces y del suelo.

Los Laberintulados (únicos Mixomicetos detectados en aguas saladas) parasitan algas y plantas acuáticas. Entre los Ficomicetos, existen tanto especies saprofitas, como parásitas y otras que atacan a animales y plantas. Los más frecuentes corresponden a los órdenes de Chytridiales y Saprolegniales. Algunas especies del género *Pythium* viven sobre huevos de cangrejos y algas.

Las levaduras y los Deuteromicetos levaduriformes están presentes tanto en el agua como en sedimentos, algas, animales y detritos. Son especies halófilas que coexisten con otras halotolerantes transitorias procedentes con frecuencia de vertidos de aguas residuales al mar. Géneros típicos de levaduras estrictamente marinas son *Metschnikowia*, *Candida*, *Rhodotorula* y *Torulopsis*.

En ambientes costeros y sobre maderas y restos vegetales así como en restos animales y conchas, se han encontrado hongos Ascomicetos superiores y Deuteromicetos saprofitos descomponedores de la lignina y la celulosa. Los hongos superiores estrictamente marinos (que crecen en concentraciones salinas comprendidas entre 25 y 40 g/L) suelen ser Ascomicetos, Deuteromicetos, Levaduras y Basidiomicetos.

En el mar abisal hay una microflora autóctona diferente a la del resto de ambientes marinos. Allí medran Ascomicetos de los géneros *Bathyascus* y *Oceanitis*, así como los Deuteromicetos de los géneros *Allescheriella* y *Periconia*. Para terminar este apartado, en aguas salobres (entre 5-25 g/L de sales totales) hay hongos halófilos como el *Olpidium maritimum*. Además, hongos típicos de los mares tropicales son los hongos superiores *Spartina townsendii* y *Rhizophora mangle*.

13.5.-Protozoos

Se trata de un grupo variado de protistas (células eucariotas) típicamente móviles y no fotosintéticos. Podemos considerar tres grupos principales: *protozoos flagelados* o *Mastigophora*, *flagelados ameboides* o *Rhizopoda* y los *ciliados* o *Ciliophora*. Un cuarto grupo está formado por protozoos parásitos, de especial incidencia en patogenicidad de aguas de consumo.

Los *protozoos flagelados* sufren división longitudinal para reproducirse. Pueden ser parásitos de vertebrados o invertebrados, absorbiendo los nutrientes de la sangre del hospedador: ejemplos son los *tripanosomas* y los *tricomas*.

Los *protozoos ameboides* se caracterizan por presentar movimiento ameboide con emisión de pseudópodos. Miembros del grupo son las amebas (organismos típicamente acuáticos) que pueden fagocitar pequeñas presas, bacterias y animáculos. Algunos *Rhizopoda* pueden desarrollar exosqueleto o endosqueleto. Son también frecuentes en las aguas.

Los *protozoos ciliados* son microorganismos fagotrópicos de amplia distribución en aguas dulces. Sus características más comunes son: tener estructuras móviles o *cilios*, parecidos a los flagelos pero más cortos; presentar división celular transversal; que cada individuo tenga un *macronúcleo* y un *micronúcleo* en su interior, los cuales se diferencian en su función, tamaño y estructura. Algunos ciliados presentan reproducción sexual.

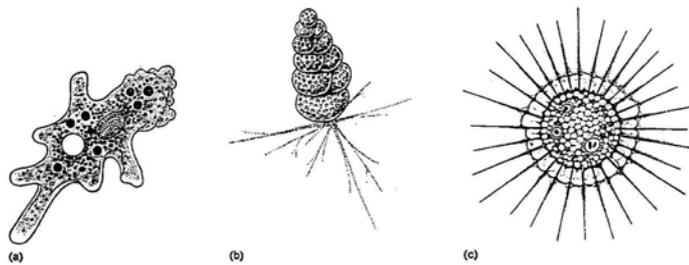


FIGURA 4.11

Algunos protozoos ameboides (*Sarcodina*). (a) Una ameba. (b) U: foraminífero. Obsérvese el caparazón con múltiples compartimentos, desde donde se extienden los pseudópodos. (c) Un heliozoo.

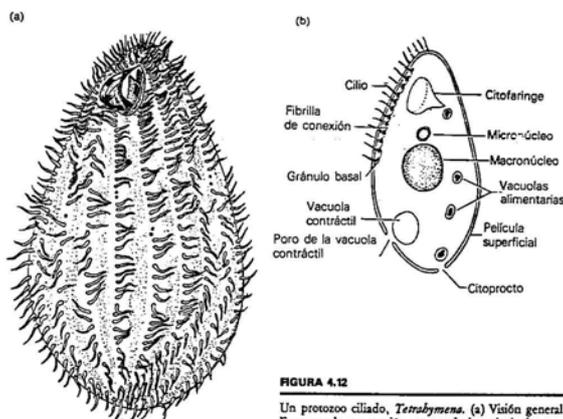


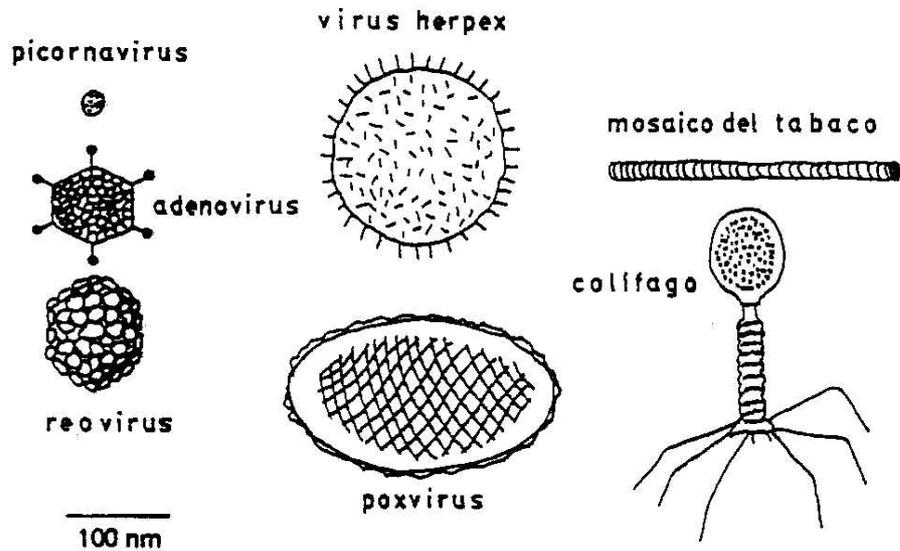
FIGURA 4.12

Un protozoo ciliado, *Tetrahymena*. (a) Visión general mostrando el aspecto externo. (b) Esquema de una sección mostrando las principales características estructurales de la célula.

13.6.-Virus

Microorganismos acelulares en la *frontera* entre la vida y el mundo inorgánico, están compuestos por el virión (integrado por ácido nucleico ADN ó ARN) y una cápside protéica. Su tamaño es extremadamente pequeño, oscilando entre las 20 milimicras de los picornavirus, y las 300 milimicras del virus del mosaico. Su descubrimiento se puso de manifiesto dado que eran tan pequeños que atravesaban los filtros que retenían bacterias, por lo cual, al principio, se los denominó "virus filtrantes". La morfología de los virus responde a tres formas principales: simetría icosaédrica, helicoidal y compleja, adoptada esta última por los virus parásitos de bacterias y otros microorganismos los cuales poseen sistemas de fijación al hospedador.

El proceso de reproducción vírica tiene lugar en cinco etapas: penetración en el interior de la célula hospedadora, síntesis de los enzimas necesarios para la replicación del ácido nucleico vírico, síntesis de los componentes del virus, ensamblado de los componentes para formar viriones maduros y liberación de los mismos a partir de la lisis o rotura de la célula hospedadora. El proceso de penetración es diferentes para virus bacterianos, vegetales y animales ya que los dos primeros tienen que atravesar la pared celular, mientras los últimos se pueden adsorber directamente por la membrana celular o incluso, penetrar por fagocitosis.



La liberación del ácido nucleico vírico dentro de la célula inicia dos procesos distintos: (a) *síntesis de proteínas* específicas del virus, y (b) *replicación del propio ácido nucleico* vírico, así como la formación de la cápside. El punto final del proceso de reproducción es la liberación de los viriones maduros desde la célula hospedadora.

Los virus se clasifican atendiendo al tipo de ácido nucleico que los conforma y a su morfología. Muchas especies de virus se transmiten vía aguas naturales, ríos, arroyos, lagos y embalses. En concreto, los virus acuáticos suelen ser parásitos de organismos superiores (cangrejos, peces) o de organismos o microorganismos típicamente encontradas en las aguas. Así, se los denomina bacteriófagos, si infectan bacterias, cianófitos si hacen lo propio con cianofíceas, etc... Los virus encontrados en aguas con más frecuencia responden a Enterovirus, Poliomielíticos, Coxsack, Virus ECHO, Reovirus, Adenovirus y Virus de la Hepatitis, todos ellos aislados en aguas contaminadas con aguas residuales procedentes bien de aglomeraciones humanas bien de animales.

Los bacteriófagos son virus ADN y están muy difundidos en las aguas. Pueden atacar las especies halófilas del género *Agrobacterium*. Una variedad importante son los virus entéricos, que parasitan las enterobacterias estando presentes en aguas residuales. Los cianófitos (virus ADN), parecidos a los bacteriófagos en tamaño y morfología, son comunes en aguas. Para acabar, existen mínimas diferencias entre virus de aguas continentales y marinas, ya que al desarrollarse dentro de otros seres vivos no "sufren" las consecuencias adversas del medio ambiente (salinidad, temperatura, luz, etc...); por ello se pueden detectar, incluso, en las aguas subterráneas.

14.-Bibliografía

- AWWA. **Standard Methods for the examination of water and waste-waters**. 18 ed., Washington (1.995).
- G. BERG. **Viral Pollution of the Environment**. Ed. C.R.C. Press, Boca Ratón (EEUU)

(1.983).

-J. CATALÁN LAFUENTE. **Química del Agua**. Ed. Alonso S.A., Madrid (1.981).

-J. CATALÁN LAFUENTE y J.M. CATALÁN ALONSO, **Ríos. Caracterización y calidad de sus aguas**. Ed. Dihidrox, Zamora (1.987).

-DEGRÉMONT. **Manual Técnico del Agua**. 4ª ed. Bilbao (1.979).

-J. GARCIA GARRIDO. **El agua en la producción**. Ed. Prensa XXI S.A., Barcelona (1.986).

-J. GERMAIN, L. COLAS y J. ROUQUET. **Tratamiento de las Aguas**. Ed. Omega S.A., Barcelona (1.982).

-N. GRAY. **Calidad de Agua Potable**. Ed. Acribia, Zaragoza (1.996).

-D.H.K. LEED. **Metallic contaminants and human health**. Ed. Academic Press, New York (EEUU) (1.972).

-R. MARGALEF. **Limnología**. Ed. Omega, Barcelona (1.983).

-R. MARIN GALVIN. **Análisis de Aguas y Ensayos de tratamiento: Principios y Aplicaciones**. Ed. G.P.E., S.A. Barcelona (1.995).

-R. MARIN GALVIN. **Química, Microbiología, Tratamiento y Control Analítico de Aguas: Una introducción al tema**. Ed. Serv. Pub. Universidad de Córdoba (1.996).

-R. MARIN GALVIN. **Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de aguas**. Ed. Díaz de Santos, Madrid (2.003).

-T. MURPHY and JAY GUO. **Aquatic Arsenic Toxicity and Treatment**. Backbuys Publishers. Leiden (2.003).

-V. NOVOTNY. **Water Quality**, 2ª ed. Español, Ed. Wiley and Sons, New York (2.003).

-ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. **Guidelines for drinking water quality, vol. 1-3**. Ginebra (2.004).

-J. A. PÉREZ LÓPEZ y M. ESPIGARES GARCÍA. **Estudio sanitario del Agua**. Ed. Serv. Pub. Universidad de Granada (1.995).

-P. PESSON, **La contaminación de las aguas continentales**. Ed. Mundi Prensa, Madrid (1.979).

-G. RHEINHEIMER. **Microbiología de las Aguas**. Ed. Acribia S.A., Zaragoza (1.987).

-J. RODIER. **Análisis de aguas**. Ed. Omega, Barcelona (1.989).

-J.M. RODRÍGUEZ MELLADO y R. MARIN GALVIN. **Fisicoquímica de Aguas**. Ed. Díaz de Santos S.A., Madrid (1.999).

-V.L. SNOEYNK y D. JENKINS. **Química del Agua**. Ed. Limusa, México (1.999).

-H. STOLP. **Microbial ecology: organism, habitats, activities**. Ed. Univ. Cambridge (1.988).

-G. TCHOBONAGLOUS y E.D. SCHROEDER. **Water Quality**. Ed. Adisson-Wesley Pub. Co., Reading (EEUU) (1.985).

R. Marín Galvín