



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Química



EL AGUA

**Mariana López Sánchez
Esther L. Romano Mendoza
Jorge Triana Méndez**

EL AGUA

Mariana López Sánchez
Esther L. Romano Mendoza
Jorge Triana Méndez

Impresión: Junio de 2005
Universidad de las Palmas de Gran Canaria
Servicio de Reprografía, Encuadernación y Autoedición de
la ULPGC

Depósito Legal: GC 415 - 2005
IISBN: 84 - 689 - 2647 - 7

ÍNDICE

▪ Introducción.	1
Estructura.	4
Propiedades físicas.	7
Propiedades químicas.	10
▪ Ciclo del agua.	14
▪ Aguas naturales.	17
Agua de mar.	17
Agua dulce.	19
▪ Tratamiento de las aguas naturales.	21
Filtración preliminar.	23
Coagulación; floculación.	23
Aireación.	25
Desinfección.	26
▪ Química de la dureza.	30
Efectos de la dureza.	31
Ablandamiento de aguas.	33
Ablandamiento por intercambiadores de iones.	34

▪ Desalinización.	36
Destilación.	36
Ósmosis.	38
Diálisis	43
Congelación.	46
▪ Contaminantes del agua.	48
Contaminantes que demandan oxígeno.	50
Contaminantes no degradables.	52
▪ Tratamientos de las aguas residuales.	56
Tratamiento primario.	58
Tratamiento secundario.	59
Tratamiento terciario.	61
Bibliografía.	67

Introducción.

Según el Diccionario de la Real Academia Española, el agua se define como: “Cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno. Líquido, inodoro, insípido en pequeña cantidad incoloro y verdoso en grandes masas, que refracta la luz, disuelve muchas manchas, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y más o menos puro, forma la lluvia, los manantiales, los ríos y los mares.”

Antes de exponer las teorías modernas sobre la naturaleza íntima del agua, vamos a ver de una forma breve y esquemática, las etapas principales que se han cubierto hasta ahora.

- El **agua**, junto con la **tierra, aire y fuego**, fueron los cuatro elementos aristotélicos componentes del planeta Tierra.
- En 1667 se discute por los Académicos florentinos de Cimento el origen de la máxima densidad del agua a 4°C.
- En 1769 Watt patentó el condensador, dando utilidad práctica al vapor.
- En 1781 Priestly la sintetiza, demostrando que era un compuesto. En este mismo año Cavendish y Lavoisier lograron descomponer el agua líquida en “aire ordinario” (oxígeno) y aire inflamable (hidrógeno).
- En 1800 Nicholson y Carlisle la descomponen con ayuda de corriente eléctrica.
- En 1884 a la vista de su manifiesta complejidad, se sugiere que el agua podía tener partículas sólidas.
- En 1891 Vernon postula los agregados de moléculas de agua con el fin de poder explicar la anomalía de la máxima densidad a 4°C.

- En 1892 Röntgen intentan explicar cualitativamente varias propiedades aparentemente anómalas del agua, siendo el primero que prestó atención a su naturaleza peculiar.
- En 1930 Morgan y Magat, respectivamente, realizan los primeros estudios de Rayos X e infrarrojo en agua líquida.
- 1932 Frenkel propone la teoría del “hueco”.
- En 1933 Bernal y Fowler proponen el primer modelo para estudiar el agua líquida.
- En 1935 Butler y en 1939 Eley, publican el resultado de sus investigaciones sobre el origen de la entropía negativa mostrada por solutos simples en disoluciones acuosas.
- En 1940 Dorsay publica una monografía “Propiedades de la sustancia ordinaria Agua” en el cual cita los ejemplos de la anormalidad del agua observados hasta entonces.
- En 1948 Hall estudia la relajación acústica en el agua.
- En 1950 se proponen varios modelos matemáticos que pretenden explicar la estructura del agua.
Frank propone que más que estructuras de larga vida, hay en el agua líquida desdoblamientos de estructuras, es decir “racimos fluctuantes” de moléculas con enlaces de hidrógeno temporales.
- Varios científicos prestan atención a enlace hidrofóbico en sistemas de biopolímeros para ayudar a comprender a los bioquímicos, la naturaleza peculiar del medio disolvente, en el que se desarrollan los procesos vitales.
- En 1951 Pople da un gran avance en el conocimiento del agua con sus estudios sobre las propiedades del enlace de hidrógeno.

- 1961 Deryagin y otros, estudiando las propiedades del agua en lámina delgada y en capilares angostos ($d < 20\text{nm}$) obtiene un líquido condensado en una atmósfera de vapor de agua no saturado. Enfriando este líquido se separa en dos fases, una parecida al agua ordinaria que puede ser separada por destilación, y la otra (que no se congela a 0°C , de alta viscosidad y $d = 1,3\text{ g/cc}$ que se llamó poliagua y es una modificación estructural del agua.
- En 1962 Nemethy y Scheraga, hacen un primer ensayo de estudio cuantitativo, aplicando la mecánica estadística, en el desarrollo de la naturaleza molecular del agua y de soluciones acuosas de solutos apolares y proteínas. Posteriormente se aplican los rayos Raman, infrarrojo y perfil espectral al estudio de las unidades intramoleculares sueltas O-H y O-D así como a H_2O y D_2O .
- En 1969 Drost-Hausen plantean la existencia de anomalías termales (enredamientos y discontinuidades termales) que consisten en la transición a un mayor orden estructural (se producen alrededor de los $15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$ y 60°C) dando origen a discontinuidades en las propiedades físicas. Este tema aún no se ha resuelto.

La naturaleza físico - química del agua, así como su abundancia y distribución hacen de esta especie química la más importante de todas las conocidas. La importancia del agua desde el punto de vista químico reside en que la casi totalidad de los procesos que ocurren en la naturaleza, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua. ***“El agua es la base de la vida”***. Multitud de hechos avalan la confirmación anterior:

1. Debido a sus temperaturas de fusión y ebullición, es la única sustancia que se encuentra en forma natural en la Tierra, en los tres estados físicos.
2. Juega un papel vital en el desarrollo de los seres vivos.
3. Es el componente mayoritario de los organismos vivos.

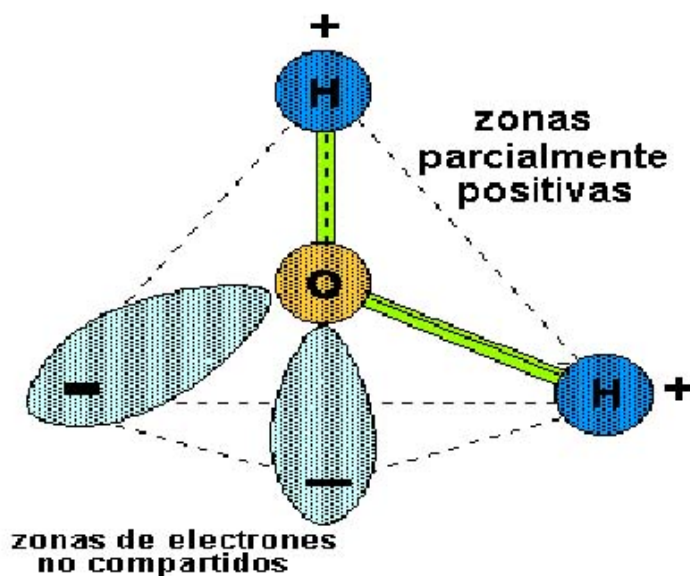
4. Es el vehículo utilizado por la naturaleza como portador de nutrientes.
5. Es el medio universal y único en el que se realizan las reacciones organo-biológicas.
6. Su calidad condiciona la calidad de los alimentos.
7. En su seno se realizan muchos procesos geoquímicos.
8. Ejerce una gran influencia en el desarrollo de la agricultura, como elemento auxiliar de fabricación, como refrigerante o transportador de calor, fuente de energía, etc.
9. Gran número de compuestos toma el estado coloidal en su contacto.

Estructura del agua.

El agua es una sustancia tan común en la Tierra que a menudo se desprecia su naturaleza única. Para comprender por qué el agua es diferente se tiene que examinar la estructura electrónica de la molécula de H_2O .

La estructura del electrón orbital de un átomo de hidrógeno aislado es $1S^1$, mientras que la del átomo de oxígeno aislado es $1S^2 2S^2 2P_x^2 2P_y^1 2P_z^1$.

La molécula del agua posee la estructura: $\text{H} - \text{O} - \text{H}$, formándose dos enlaces covalentes σ (cada uno con un aporte iónico del 40%) y con una entalpía de disociación de 110,2 Kcal/mol por cada uno de los enlaces, lo cual confiere a la molécula del de agua una gran estabilidad, especialmente en la naturaleza.



Disposición tetraédrica.

Radio de Van der Waals del átomo de Oxígeno = $1,4 \text{ \AA}$.

Radio de Van der Waals del átomo de Hidrógeno = $1,2 \text{ \AA}$.

Longitud del enlace covalente = $0,961 \text{ \AA}$.

Angulo de enlace = $104^{\circ} 27'$.

Momento dipolar neto = $1,85 \cdot 10^{-18} \text{ uee} = 1,85 \text{ D}$.

Distancia entre los núcleos O - H = $0,96 \text{ \AA}$.

Distancia entre los núcleos H - H = $1,513 \text{ \AA}$.

Enlaces entre moléculas de agua próximas. -

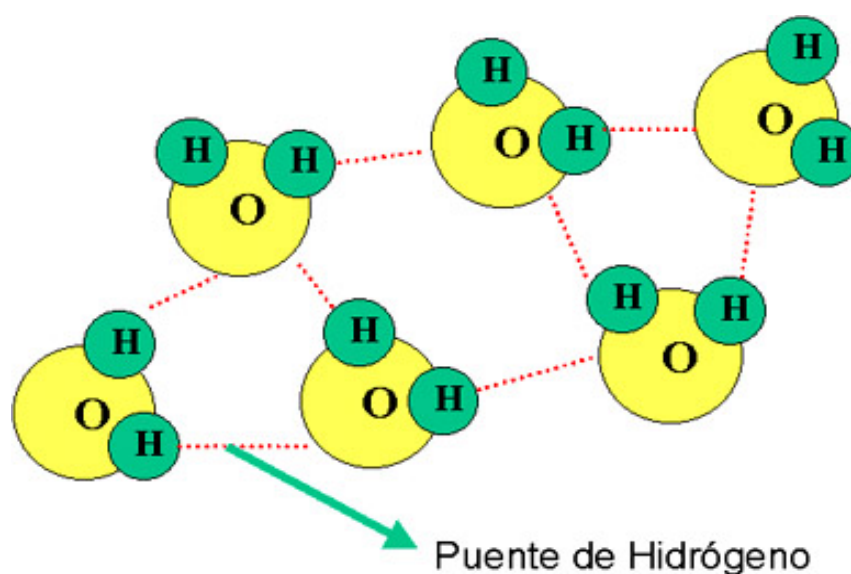
El elevado momento dipolar de la molécula de agua engendra fuerzas atractivas intermoleculares, que hacen que estas moléculas tiendan a asociarse con gran fuerza. Esta gran fuerza atractiva intermolecular del agua, se debe a la tendencia a formar enlaces de hidrógeno sobre una base tridimensional. Estos tipos de interacción dipolo-dipolo, son especialmente fuertes, participando siempre un átomo de hidrógeno

El mecanismo exacto del enlace de hidrógeno no es bien conocido. Se sabe que, en la formación del mismo, están implicadas varias fuerzas, entre las que se encuentran:

- La energía electrostática.
- Las energías de deslocalización (resonancia) del electrón.
- Las energías de dispersión.
- Las fuerzas repulsivas.

La alta electronegatividad del átomo de oxígeno genera una atracción de los electrones de enlace, produciendo sobre cada átomo de hidrógeno una carga parcial positiva. Como los orbitales del enlace H - O se localizan sobre los ejes de un tetraedro imaginario, estos dos ejes pueden ser considerados como representando líneas de fuerzas positivas (enlace de hidrógeno como dador), mientras que los dos pares de electrones solitarios se encuentran en los ejes restantes, a lo largo del tetraedro imaginario, representando las líneas de fuerzas negativas (enlace de hidrógeno como aceptor). Debido a estas cuatro líneas de fuerzas, cada molécula de agua tiene capacidad para establecer enlaces de hidrógeno con un máximo de cuatro.

Esta capacidad del agua de situar los enlaces de hidrógeno en las tres dimensiones proporciona una explicación lógica para muchas de las propiedades anómalas del agua.

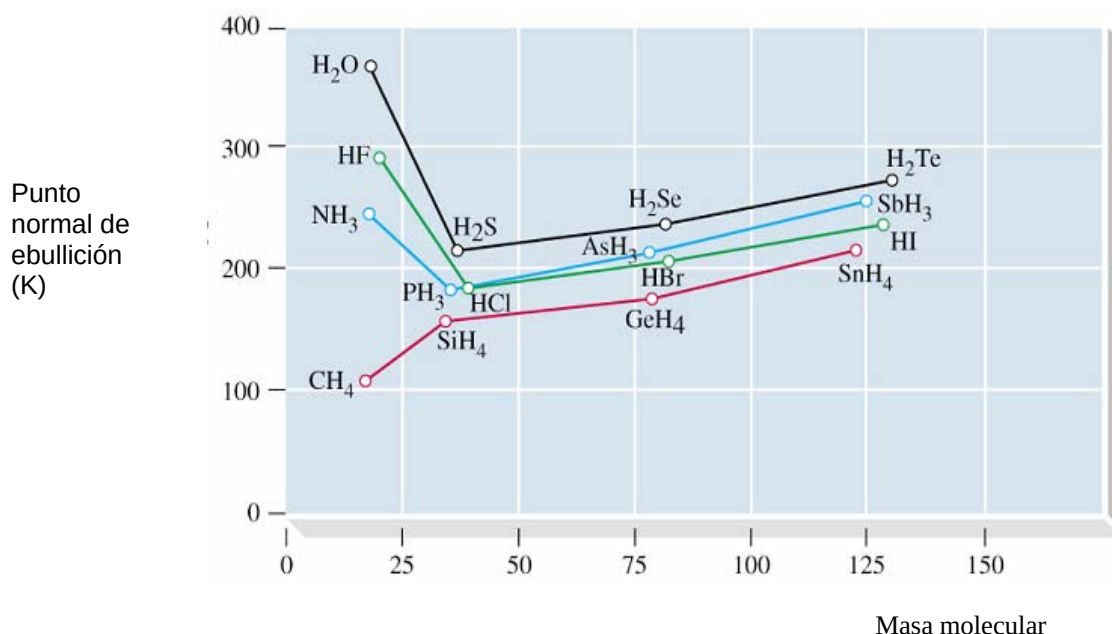


Propiedades físicas del agua. -

- Puntos de fusión y ebullición.**

Los enlaces por puente de hidrógeno hacen que los puntos de fusión y ebullición del agua sean mucho más altos de lo esperado. Los puntos de fusión y ebullición de casi todos los compuestos similares siguen el patrón de expandirse conforme aumentan los pesos moleculares de los compuestos. Si el agua se ajustara a este patrón cuando se le compara con compuestos químicamente relacionados, debería hervir alrededor de los 90 °C bajo cero y congelarse a 100°C bajo cero. El agrupamiento de las moléculas del agua origina el cambio en los puntos de congelación y ebullición, si no existieran los enlaces por puente de hidrógeno el agua sería un gas a la temperatura ambiente.

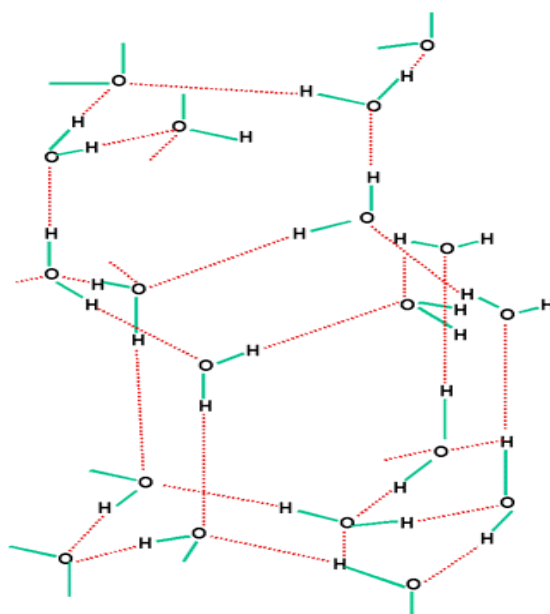
Compuesto	Punto de fusión °C	Punto de ebullición °C	Peso molecular g/mol.
H ₂ O	0	100	18
H ₂ S	- 83	- 60	34
H ₂ Se	- 59	- 41	80
H ₂ Te	- 48	- 4	129



- **Densidad.**

La densidad del agua es 1g/cm^3 (exactamente $0,99999\text{ g/cm}^3$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$) y, como sabemos aumenta anormalmente al elevar la temperatura de 0°C a 4°C , en la que alcanza su máximo valor 1g/cm^3 , exactamente a $3,98\text{ }^\circ\text{C}$.

La mayoría de las sustancias se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. El agua se rige por este comportamiento excepto en que a 4°C ya no se contrae sino que comienza a expandirse. La existencia del enlace por puentes de hidrógeno explica este anómalo comportamiento. El agua caliente contiene numerosos grupos de moléculas con puente de hidrógeno. Estos grupos se rompen y vuelven a formarse en fracciones de segundo. A medida que el agua se enfría las energías cinéticas de las moléculas disminuyen y se forman conglomerados más grandes por medio de los puentes de hidrógeno. Las moléculas se acercan más entre sí y se reduce el volumen del líquido. A $4\text{ }^\circ\text{C}$ las energías cinéticas de las moléculas del agua son lo suficientemente bajas para que los puentes de hidrógeno se conviertan en la fuerza dominante que rige la disposición de las moléculas de líquido. Estos se acomodan a un patrón en el que se puede producir la máxima cantidad de puentes de hidrógeno. Conforme se produce la congelación, las moléculas de agua forman una red de moléculas de agua con puentes de hidrógeno, semejantes a una jaula, que es característica del hielo.



En la fase sólida la estructura es tal que las moléculas de agua están más separadas aún que lo que estaban en la forma líquida. Por eso el hielo es menos denso que el agua. A medida que el hielo se derrite, para volver a su estado líquido, algunos de los puentes de hidrógeno se rompen, la estructura semejante a la jaula se desmorona y las moléculas de agua se vuelven a acercarse más.

Este comportamiento poco común del agua tiene una gran importancia para el hombre. Si el hielo fuera más denso que el agua, se hundiría en el fondo de los lagos y los ríos; entonces el hielo se acumularía en el fondo y terminaría por congelar los lagos, ríos y mares del planeta, con lo que la vida en el seno de al agua, aun en los polos no sobreviviría. El fenómeno de la expansión del agua en la congelación, es el que ha tenido mayor influencia sobre la naturaleza de la superficie de la Tierra. El agua, debido a su elevada tensión superficial penetra fácilmente en las grietas de las rocas, donde por congelación, fragmenta la roca, constituyendo a la formación del suelo.

- ***Tensión superficial.***

Es una propiedad de las superficies que limitan dos fases y se define como la fuerza de tracción que se ejerce en la superficie del líquido y tiende siempre a reducir lo más posible la extensión de dicha superficie, y en consecuencia la superficie líquida está sometida a cierta deformación y la tensión superficial del agua máxima es $\gamma = 72,75 \text{ Dy/cm}$ a 20°C (la más alta de cualquier sustancia conocida) y disminuye con la temperatura hasta alcanzar un valor nulo en el punto crítico.

La tensión superficial del agua aumenta generalmente al añadir sales. Por ejemplo, para una disolución acuosa 1M en NaCl a 18°C la $\gamma = 74,6 \text{ Dy/cm}$. La presencia en el agua de algunos cuerpos (llamados tensoactivos) disminuye la tensión superficial. La tensión superficial del agua provoca los fenómenos de capilaridad.

- ***Propiedades térmicas.***

El agua tiene capacidad calorífica de $C_e = 1\text{cal/g}^\circ\text{C}$ a 15°C , siendo el amoníaco el único líquido conocido que la supera.

Calor latente de fusión = 80 cal g

Calor latente de vaporización = 540 cal/g

Debido a los valores elevados del calor latente y calor específico, las grandes extensiones de este elemento sobre la superficie de la Tierra, le hace actuar como un verdadero regulador del clima. Los océanos actúan como enormes termostatos en los cuales la energía calorífica es llevada a las regiones frías por corrientes como la del Golfo-trean. La utilización del agua en la industria, como fluido portador de calor se debe a la misma razón.

- ***Propiedades eléctricas del agua.***

Constante dieléctrica $\epsilon = 80$ una de las más elevadas que se conocen, por lo que el agua posee un alto poder ionizante. Conductividad eléctrica. Es muy baja del orden de $4,2 \cdot 10^{-6}$ Siemens/m (la más baja que se ha conseguido). El submúltiplo más empleado es micro Siemens/cm = $\mu\text{ S/cm}$.

- ***Propiedades ópticas.***

La transparencia del agua depende de la longitud de onda de la luz que la atraviesa. Los rayos U.V. la atraviesan bien pero los IR apenas penetran en ella. Esta transparencia se utiliza frecuentemente para medir ciertas formas de contaminación y, por tanto, la eficacia de los tratamientos de depuración.

Propiedades químicas . -

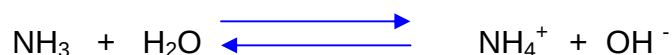
La elevada energía de formación de la molécula de agua le aporta una gran estabilidad. Esta estabilidad unida a las propiedades eléctricas y a su constitución molecular característica le hace especialmente apta para la disolución de numerosas sustancias. En efecto, la mayor parte de las especies minerales, así

como un gran número de gases y productos orgánicos, pueden disolverse en agua. El agua, además es uno de los mejores reactivos químicos, interaccionando con iones y moléculas.

Las reacciones con el agua se cuentan entre las más frecuentes dado el papel predominante del agua como disolvente. Las reacciones con el agua son llamadas, en general, reacciones de hidrólisis. Entre ellas podemos citar:

Reacciones ácido-base.

Se deben al hecho de que el agua tiene carácter anfótero.



La formación de iones metálicos hidratados en disolución acuosa es un ejemplo del comportamiento del agua como base de Lewis.



Reacciones redox.

El agua puede actuar como oxidante y como reductor aunque sus capacidades oxidantes y reductoras son limitadas.

Cuando actúa como oxidante se reduce a H_2



Por ejemplo: cuando reacciona con el Na, o con otros metales que son reductores energéticos:



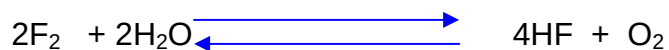
A temperaturas elevadas el agua-vapor oxida al carbón a monóxido de carbono.



El agua es un agente reductor bastante débil

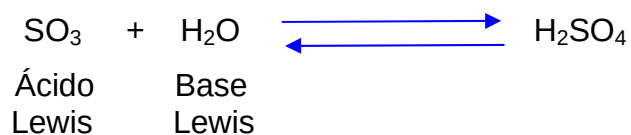


Sólo reduce a los oxidantes muy fuertes como el flúor según el proceso:

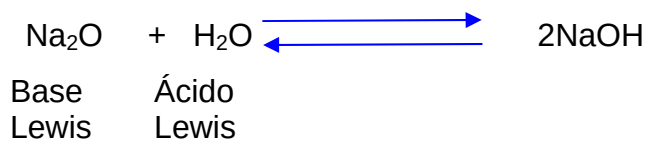


Reacciones con los óxidos.

a) Óxidos no metálicos.



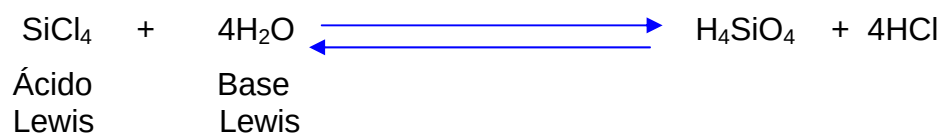
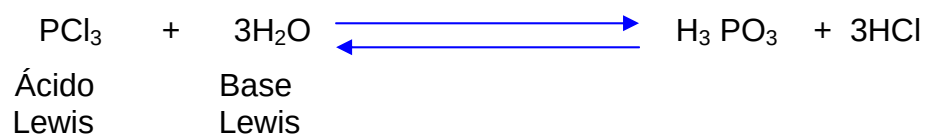
b) Óxidos metálicos.



Es una reacción ácido – base entre el ión óxido (base fuerte) y el agua (ácido débil).

Reacciones con los haluros.

La mayoría de los haluros de los no metales reaccionan con el agua para dar el ácido oxoácido del no-metal y el haluro de hidrógeno.



Finalmente indicar que el agua presenta un cúmulo de propiedades que va desde ser una de las sustancias más corrosivas conocidas a ser, por otra parte inocua desde el punto de vista fisiológico.

Otras reacciones importantes del agua las veremos a lo largo del desarrollo del tema.

Ciclo del Agua.

El agua natural, agua que encontramos en la superficie de la corteza terrestre, sea dulce o salada, está sometida a las radiaciones energéticas procedentes del sol. Como consecuencia de ello una parte de la misma sufre un cambio de estado pasando a vapor y a la atmósfera. Este vapor de agua cuando llega a las capas altas de la atmósfera, donde la temperatura es más baja, se condensa formando diminutas gotitas, al conjunto de las cuales se les llama nubes. Cuando estas gotas se hacen mayores, la atracción de la Tierra aumenta, cayendo sobre ella en forma de lluvia, la cual, una vez sobre la misma, discurre, una parte sobre la superficie constituyendo las aguas de escorrentías, que luego unidas forman los ríos. Otra parte se filtra a través de la superficie terrestre (aguas de infiltración), para circular por el interior de la misma, constituyendo las aguas subterráneas, que luego afloran a la superficie en forma de manantiales fuentes o por medio de pozos.

Unas y otras en su circulación por la superficie o interior de la Tierra van a parar al mar completando de esta forma el llamado ciclo hidrológico del agua. El ciclo es continuo y así el agua es una fuente renovable. (La escorrentía anual a los océanos se calcula en 34.400 Km^3).

A lo largo de estos pasos, el agua sufre una serie de transformaciones. Así, el paso de líquido a vapor constituye una destilación que la libera de todas las impurezas que contiene (tratamiento natural del agua). Al licuarse el vapor y caer a la Tierra en forma de lluvia disuelve diversas sustancias que se encuentran en la atmósfera, más cuanto más concentradas estén en la misma. Ya en la superficie terrestre siguen disolviendo sustancias, más las subterráneas que las superficiales, hasta llegar al mar donde se encuentran las aguas superficiales más cargadas de sales.

Además del ciclo hidrológico del agua, existe un subciclo biológico, el cual hace que se renueven sobre la Tierra, anualmente, del orden de $6,5 \cdot 10^{11}$ Tm, como resultado de la función clorofílica de las plantas verdes (fotosíntesis) y de los organismos marinos.

En relación con las aguas superficiales se suelen clasificar en dulces o saladas según estén más o menos concentradas en sales. Las aguas dulces constituyen las aguas de los manantiales, lagos, ríos, etc.

Se ha calculado que el volumen total de agua disponible en la Tierra es de 1500 millones de Km^3 de los cuales el 97,2% se encuentra en los mares. En la tabla siguiente se indica la distribución del agua en la hidrosfera medida en porcentaje referido a los 1500 millones de Km^3 .

Lugar	Porcentaje %
Mares	97,2
Casquetes polares y glaciares	2,15
Humedad del suelo y agua freática	0,63
Agua superficial (lagos, ríos y corrientes de agua dulce, y lagos y mares salados)	0,019
Agua atmosférica	0,001

En la figura siguiente se indica el ciclo del agua en la naturaleza.



Aguas naturales. Su composición.

El agua es el líquido más común sobre la Tierra. Cubre el 72 % de la superficie terrestre tanto en estado líquido (océanos, mares, lagos, ríos) como en forma sólida (hielo de los glaciares) y en estado gaseoso (vapor de agua en las capas bajas de la atmósfera), y es indispensable para los seres vivos.

Todos los organismos vivos presentan un gran contenido en agua que alcanza al 97 % de la masa corporal de las medusas y entre 65-70 % en el caso del hombre.

A continuación vamos a realizar un estudio sobre la composición de las aguas naturales.

- ***Agua de mar.***

El mar es el hábitat de una increíble cantidad de vida animal y vegetal. En realidad se trata de una gigantesca disolución de iones y otras sustancias en las que existen tales plantas y animales. Cada parte de los constituyentes disueltos en el agua del mar son iones y se ha comprobado que se producen pocas variaciones en las cantidades relativas de dichos iones. El agua de mar contiene cerca del 3,5 % en peso de iones disueltos. Los principales constituyentes del agua de mar se indican en la tabla siguiente.

<i>Especie química</i>	<i>Concentración en ppm.</i>
Na^+	10760
Mg^{+2}	1294
Ca^{+2}	413
K^+	387
Sr^{+4}	8
H_3BO_3	4
N_2	10
O_2	7
CO_2	600
Cl^-	19535
SO_4^{-2}	2712
HCO_3^-	142
Br^-	67
F^-	1

De la tabla anterior se deduce que los más abundantes son los iones Cl^- y Na^+ , lo que explica que el agua de mar tenga sabor salobre.

La salinidad del agua de mar se define como la masa en gramos de los sólidos obtenidos en un Kg de agua de mar evaporada a una masa constante a 480°C.

$$\text{Salinidad del agua de mar} \cong 35 \text{ g /Kg} = 35000 \text{ ppm.}$$

La conductividad (σ) que se mide a 25°C, permite calcular la salinidad de un agua. Los criterios de calidad para la conductividad son:

$\sigma \leq 400 \text{ } \mu \text{ S/cm}$ tenemos agua de excelente calidad.

$\sigma \text{ } 400 - 2000 \text{ } \mu \text{ S/cm}$ se puede usar con fines agrícolas.

Como se puede observar los océanos constituyen un inmenso almacén de muchas sustancias. Aunque la baja concentración de la mayoría de ellas hace inviable económicamente en la actualidad cualquier procedimiento de separación, hay dos sustancias importantes que se extraen comercialmente del agua de mar; el cloruro sódico y el magnesio. Antiguamente se obtenía también el bromo, pero actualmente la mayor parte del bromo se obtiene de salmueras subterráneas.

- El NaCl se obtiene depositando el agua de mar en estanques poco profundos (salinas), y dejando que se evapore el H₂O por la acción del sol.
- El magnesio se separa del agua de mar por adición de CaO (cal), que precipita el Mg (OH)₂.



- El Hidróxido de magnesio se filtra y se trata con HCl dando el cloruro de magnesio.



- El MgCl₂ acuoso obtenido se seca, se funde y se le somete a electrólisis.



- **Agua de ríos y lagos.**

El agua de mar tiene una salinidad constante; pero las aguas de los ríos, lagos y manantiales tienen una composición variable, debido a que han estado en contacto con diferentes formaciones geológicas. Exceptuando las aguas de los lagos salados, las aguas naturales de ríos, lagos y manantiales que no son salados se les llama “**agua dulce**”.

Los iones más frecuentes en este tipo de aguas son: sodio, potasio, magnesio, calcio, ferroso, bicarbonatos y sulfatos, gases disueltos como O_2 ; N_2 y CO_2 así como materia orgánica, extraída de restos de animales y vegetales en descomposición. Además puede llevar materias en suspensión tales como arcilla, fragmentos de materia orgánica y microorganismos vivos.

Puesto que el agua superficial, junto con la de pozos sirve para uso y consumo público se han establecido unas normas químicas generales para las aguas superficiales destinadas a captación para el agua de consumo que se indican en la tabla siguiente.

Especies químicas	Máxima concentración permitida en p.p.m.
Arsénico	0,05
Bario	1,00
Cadmio	0,01
Cloruro	250
Sulfatos	250
Cobre	1,00
Cianuro	0,20
Fluoruro	2,00
Hierro	0,30
Plomo	0,05
Sulfonato de alquilo lineal	0,50
Manganeso	0,05
Nitritos + Nitratos	10
Selenio	0,01
Plata	0,05
Compuestos químicos orgánicos sintéticos	0,15
Total sólidos disueltos	500
Cinc	5,00

Tratamiento de las aguas naturales.

El agua absorbe rápidamente tanto las sustancias naturales como las producidas por el hombre, convirtiéndola en inadecuada para su consumo sin algún tipo de tratamiento. Los grupos importantes de sustancias que pueden considerarse indeseables en exceso son:

- **Color.** Esto se debe a la presencia de materia orgánica disuelta proveniente de suelos de turba, o sales minerales de hierro y manganeso.
- **Materia suspendida.** - Esto es mineral fino o materia vegetal que no es capaz de sedimentar en las condiciones reinantes.
- **Turbidez.-** Esta es una medida de la claridad o transparencia del agua, se puede deber a muchos factores, como finas partículas de minerales en suspensión, alta concentración de bacterias o incluso finas burbujas debido a la excesiva aireación.
- **Patógenos.-** Pueden ser virus, bacterias, u otro tipo de organismos patógenos que pueden afectar negativamente a la salud del consumidor. Pueden proceder de las aguas residuales tanto de humanos como de animales que contaminan los recursos del agua.
- **Dureza.-** La excesiva y extremadamente baja dureza son igualmente indeseables. El exceso de dureza se presente con frecuencia en las aguas subterráneas, mientras que las aguas blandas son mas frecuentes en cuencas de captación de tierras altas.
- **Sabor y Olor.-** El sabor y olor desagradable se debe a una variedad de razones tales como: contaminación por aguas residuales, excesiva concentración de algunas especies químicas como el hierro, aluminio o manganeso; vegetación en estado de putrefacción, condiciones de

estanqueidad debido a la falta de oxígeno en el agua, o a la presencia de ciertas algas.

- **Productos químicos nocivos.-** Existe una gran variedad de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas que son tóxicas y nocivas, que pueden aparecer en los recursos del agua. Estas son absorbidas por los sólidos y se debe a contaminación por aguas residuales industriales y domésticas.

El tratamiento y distribución del agua es el proceso por el cual el agua se toma de los recursos del agua, se convierte en agua apta para el consumo y entonces se transporta al consumidor. Esta es la primera mitad del ciclo del agua de consumo humano. La segunda mitad del ciclo es la recolección, tratamiento y vertido del agua utilizada (aguas residuales).

El tratamiento del agua debe producir un agua que sea:

- **Grata.-** Es decir, que no tenga sabor desagradable.
- **Saludable.-** No debe contener ningún organismo patógeno o producto químico nocivo para la salud.
- **Limpia.-** Libre de materias suspendidas o turbidez.
- **Sin color ni olor.-** Estética para el consumo.
- **Razonablemente blanda.-** Que pueda permitir a los consumidores la higiene personal, y lavar la ropa y la vajilla sin excesivo uso de jabones y detergentes.
- **No corrosiva.-** El agua no debe oxidar las tuberías o facilitar el lixiviado de metales de las tuberías y depósitos.

Los principales procesos en el tratamiento del agua, llamado también **Tratamiento Físico – Químico**, en orden general de aplicación son:

- **Filtración preliminar.**

El agua pasa a través de una serie de tamices gruesos para eliminar los sólidos voluminosos como palos, hierbas u otros materiales de gran tamaño, antes de pasar a la planta. Esto se realiza principalmente para evitar que las tuberías se bloqueen y las bombas se dañen.

- **Almacenamiento.**

El agua bruta se bombea desde la toma a un embalse de almacenamiento con el fin de que vaya sedimentando la arenilla y otras partículas muy pequeñas (coagulación y floculación). Este proceso se favorece alcalinizando previamente agua por adición de cal y posteriormente, para favorecer la precipitación, se le añade alumbre (sulfato de aluminio), para formar un precipitado gelatinoso de hidróxido de aluminio. Este precipitado se va depositando lentamente y arrastra consigo gran parte de la materia en suspensión.



- **Coagulación.**

Los coagulantes se añaden al agua para obligar a las partículas en suspensión a agregarse en partículas mayores conocidas como flóculos. La coagulación consiste en introducir en el agua un producto capaz de:

- * Neutralizar la carga de los coloides, generalmente negativos, presentes en el agua.
- * Formar un precipitado.

La elección del coagulante depende de la naturaleza de las aguas a tratar y de condiciones económicas. Los coagulantes usados principalmente son sales de aluminio, polímeros de aluminio y sales de hierro. La sal metálica actúa sobre los coloides del agua por medio del catión, que neutraliza las cargas negativas de este antes de precipitar.

El proceso general para las sales de aluminio es:



Polímeros de aluminio.

En ciertas condiciones, las sales de aluminio pueden condensarse llegando a la formación de polímeros capaces de coagular y flocular. Se forma así el policloruro básico de aluminio (PCBA). Los polímeros de aluminio se obtienen tratando el cloruro de aluminio con sosa obteniéndose polímeros de la forma $\text{Al}_6(\text{OH})_{12}^{+6}$ y $\text{Al}_{54}(\text{OH})_{144}^{+8}$, cuyas propiedades coagulantes son excepcionales.

Sales de hierro.



Floculación.

La agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras constituye la floculación, que da lugar a la formación de flóculos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del

agua. Algunas sustancias pueden favorecer la formación del flóculo; a estos se les llama floculantes.

Los floculantes, llamados también “ayudantes de coagulación”, “ayudantes de floculación” e incluso “ayudantes de filtración”, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. El floculante que mejores resultados ha dado es la sílice activada. Se introduce generalmente después del coagulante y se prepara neutralizando parcialmente la alcalinidad de una disolución de silicato sódico.

- ***Tamizado.***

Seguidamente se hace pasar nuevamente el agua a través de un filtro y con frecuencia a través de carbón activo. La adsorción sobre carbón consiste en hacer pasar el agua a través de unas columnas llenas de carbón granular activado. Como el carbono es bastante poroso y tiene una gran área superficial los contaminantes orgánicos se adhieren a la superficie del carbón. Sirve también para filtrar los sólidos suspendidos. Este método es bueno para eliminar casi todos los compuestos orgánicos residuales y la mayoría de los sólidos suspendidos en el agua. El carbono se puede regenerar calentándolo en un horno para quemar el material orgánico absorbido.

- ***Aireación.***

A continuación el agua es pulverizada en aire para acelerar la oxidación de las sustancias disueltas, incrementando de esta manera la calidad del agua, especialmente su sabor. La aireación reduce también ciertos olores desagradables y la corrosión del agua por la eliminación de cualquier gas de dióxido de carbono presente por la elevación del pH. La aireación no puede reducir las propiedades corrosivas del agua ácida y es necesaria una neutralización con cal.

- ***Desinfección.***

Para completar la destrucción de ciertas sustancias minerales disueltas en el agua (compuestos de hierro o manganeso), supresión de sabores y olores y la destrucción de gérmenes patógenos, se procede mediante procesos físicos (UV) o químicos (oxidación). Se suele utilizar como oxidantes Cl_2 y sus derivados, ozono y bromo.

El O_3 es un oxidante muy potente y se tiende a utilizar donde el agua natural contiene materiales que podrían combinarse con el cloro para generar olores desagradables. El ozono tiene el inconveniente de que es más caro que la cloración y que debe ser producido in situ.

La radiación U.V. se emite con unas lámparas especiales y es efectuada siempre y cuando el tiempo de exposición sea el adecuado. Para que sea efectiva la energía debe alcanzar los ácidos nucleicos de los organismos más grandes para producir cambios estructurales que impidan la multiplicación de los patógenos. Las lámparas están encerradas en cámaras de reacción de acero inoxidable. Se suelen utilizar en plantas pequeñas o en instituciones donde la posibilidad de contaminación después del tratamiento es poco probable.

El cloro es el agente oxidante más utilizado para la desinfección. Su acción bactericida se debe a la destrucción de las enzimas, indispensables para la vida de los agentes patógenos. Además, es el más barato, fácil de transportar en tanques y vertirse directamente al agua. Tiene una elevada solubilidad en agua (7g/l) y el residuo que queda en disolución continúa destruyendo patógenos después de que el agua haya salido de la planta y conforme circula por la red de distribución.

Aunque es tóxico para los microorganismos se piensa que no es nocivo para los humanos en las concentraciones en que se utiliza. Sin embargo, un trabajo reciente (USA) ha identificado una posible conexión entre cáncer de vejiga y la cloración. En USA las concentraciones de cloro utilizado en el agua potable

es bastante superior a la europea. Sin embargo, el cloro es un producto químico peligroso de manejar cuando está concentrado y produce un gas venenoso.

El cloro disuelto en agua reacciona con su disolvente según la reacción:



Que va acompañada del proceso secundario:



El sentido de desplazamiento de estas reacciones depende del pH del medio.

Si el pH < 2 todo el cloro se encuentra en forma molecular.

Si pH = 5 todo el cloro se encuentra en forma de ácido hipocloroso.

Si pH = 10 el cloro se encuentra totalmente en forma de ión hipoclorito.

Entre pH = 5 y pH = 10 se tiene una relación variable de HClO y ClO⁻

El cloro es más eficaz en medio ácido que en medio alcalino puesto que su efecto bactericida es mayor cuando se encuentra en forma de hipoclorito.

También se utiliza con bastante frecuencia el hipoclorito sódico (llamado agua de Javel o lejía).



Seguido de la hidrólisis del ión hipoclorito:



La diferencia con el anterior es que el pH de la disolución es básico y pueden precipitar la dureza del agua de dilución en los depósitos de preparación y producir incrustaciones las tuberías. Esto se evita preparando la disolución 24

horas antes de ser utilizada para que los precipitados formados tengan tiempo suficiente para sedimentar.

Decloración.

Para eliminar el cloro residual (tóxico para la vida acuática) se añade una etapa llamada decloración que se realiza fundamentalmente con compuestos de azufre (SO₂).

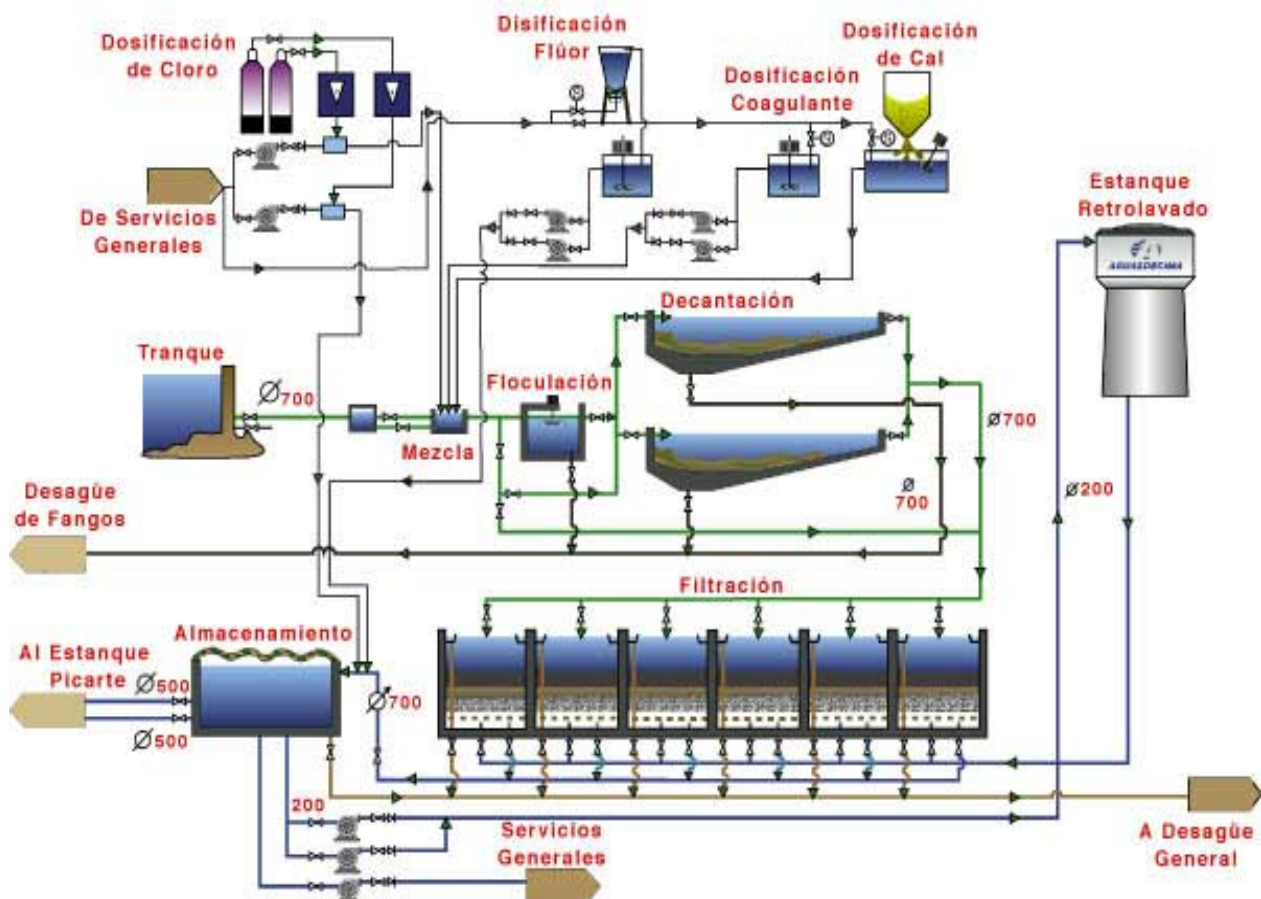


Ajuste del pH.

También se debe ajustar el pH del agua final de tal forma que no sea demasiado ácida y pueda corroer las conducciones metálicas de distribución y las cañerías domésticas, o demasiado alcalina, lo cual implicaría la deposición de sales en el sistema de distribución, originando una reducción en el caudal. El pH se puede ajustar en algunas de las etapas o al final del proceso. Se utilizan bases como CaO, carbonato sódico o sosa cáustica para aumentarlo y sales como Na(HSO₄) para disminuirlo.

El agua no se encuentra totalmente pura ni siquiera después de este tratamiento, continúa teniendo pequeñas cantidades disueltas, sobretudo cloruros, sulfatos, fluoruros, bicarbonatos de sodio, potasio, magnesio y calcio. Estas sales no producen efectos nocivos debido a que se encuentran en bajas concentraciones; además proporcionan los minerales esenciales para el organismo. También contiene gases disueltos sobre todo oxígeno, nitrógeno dióxido de carbono. El oxígeno disuelto es fundamental para las formas de vidas acuáticas.

Secuencia General del Tratamiento de un Agua



Química de la dureza.

La dureza de las aguas está producida por la presencia de iones metálicos como el Ca^{+2} y Mg^{+2} en disolución. Pero de hecho todos los cationes divalentes originan dureza.

En la tabla siguiente se indican los cationes metálicos que causan la dureza del agua y los principales aniones asociados con ellos.

Cationes	Aniones
Ca^{+2}	HCO_3^-
Mg^{+2}	$\text{SO}_4^{=}$
Sr^{+2}	Cl^-
Fe^{+2}	NO_3^-
Mn^{+2}	SiO_3^{-2}

Los criterios de clasificación de las aguas en duras y blandas son arbitrarios y en la tabla siguiente se cita un ejemplo de clasificación utilizado para las aguas duras.

Concentración (mg/l)	Tipo de agua
0-75	Blanda
75-150	Moderada
150-300	Dura
> 300	Muy dura

La dureza es un factor importante en el sabor del agua, aunque por encima de 500 mg/l el agua tiene sabor desagradable.

Clases de durezas.

- **Dureza total:** medida directa de la dureza es la que corresponde a la totalidad de las sales de calcio y magnesio disueltas en un agua. La dureza total (Ca + Mg) se expresa en mg/l de CaCO_3 .

- **Dureza temporal o dureza de carbonatos:** es la correspondiente a la dureza que proporcionan los bicarbonatos de calcio y magnesio. Se puede eliminar por calentamiento.
- **Dureza permanente o no carbonatos:** es la producida por la presencia de sulfato, cloruros y nitratos de Ca^{+2} y Mg^{+2} disueltos en el agua.

Existen diversas formas de expresar la dureza según los países, en España se sigue la notación francesa.

1º Francés = 10 mg/l de CaCO_3

1º Alemán = 10 mg/l de CaO

Efectos de la dureza.

- **Interferencia con el uso del jabón.**

La dureza de las aguas inhibe la formación de espumas capaz de englobar grasas, partículas de polvo, etc.

El proceso es el siguiente: Los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} reaccionan con los aniones del jabón y forman un precipitado (natas), jabón sólido insoluble.



Debido a la excesiva dureza de muchas aguas se desperdician diariamente en el planeta toneladas de jabón y detergentes, ya que para conseguir un buen lavado, habría que añadir jabón en exceso. También hay que indicar que es mucho más barato el tratamiento de ablandamiento del agua que el coste del jabón que se consume en exceso. Los detergentes sintéticos se pueden usar con

mayor facilidad en el agua dura. En general, por cada grado francés de dureza se desperdician aproximadamente 120 mg/l de jabón.

- **Formación de incrustaciones.**

El agua dura produce incrustaciones o sarros en la tuberías de distribución y en las domésticas y reduce la eficiencia de las calderas con el correspondiente aumento en las mismas del consumo de combustible.

Este sarro se produce por la frecuencia de carbonatos de Ca^{+2} y Mg^{+2} que son sólidos escamosos.



- **Aspectos relativos a la salud.**

Es un hecho conocido que la dureza del agua está relacionada con ciertas enfermedades cardiovasculares, observándose un descenso de mortalidad a medida que se incrementa la dureza. También es regla general que la toxicidad de los contaminantes es significativamente menor en aguas duras que en aguas blandas. Por ello, y hasta que no sea determinada la relación causa - efecto, el ablandamiento de agua destinada a la bebida no es, en general, recomendado.

Ablandamiento de aguas.

El ablandamiento de agua se basa en la transformación de las sales disueltas, principalmente de calcio y magnesio, en compuestos insolubles, mediante la utilización de determinados compuestos químicos o también utilizando resinas o intercambiadores de iones.

En general, para realizar un proceso de ablandamiento químico, se deben realizar las siguientes operaciones:

- Cálculo de las cantidades de productos ablandadores que se necesitan.
- Mezcla rápida de los reactivos con el agua tratada.
- Floculación y sedimentación.
- Separación del agua por filtración o decantación.

En la eliminación de la dureza temporal se tiende a alterar el equilibrio químico de parte de las sustancias, por medio del calor.



También se puede eliminar utilizando cal, hidróxido de sodio, carbonato sódico o amoníaco.



Los precipitados obtenidos se eliminan por decantación o filtración.

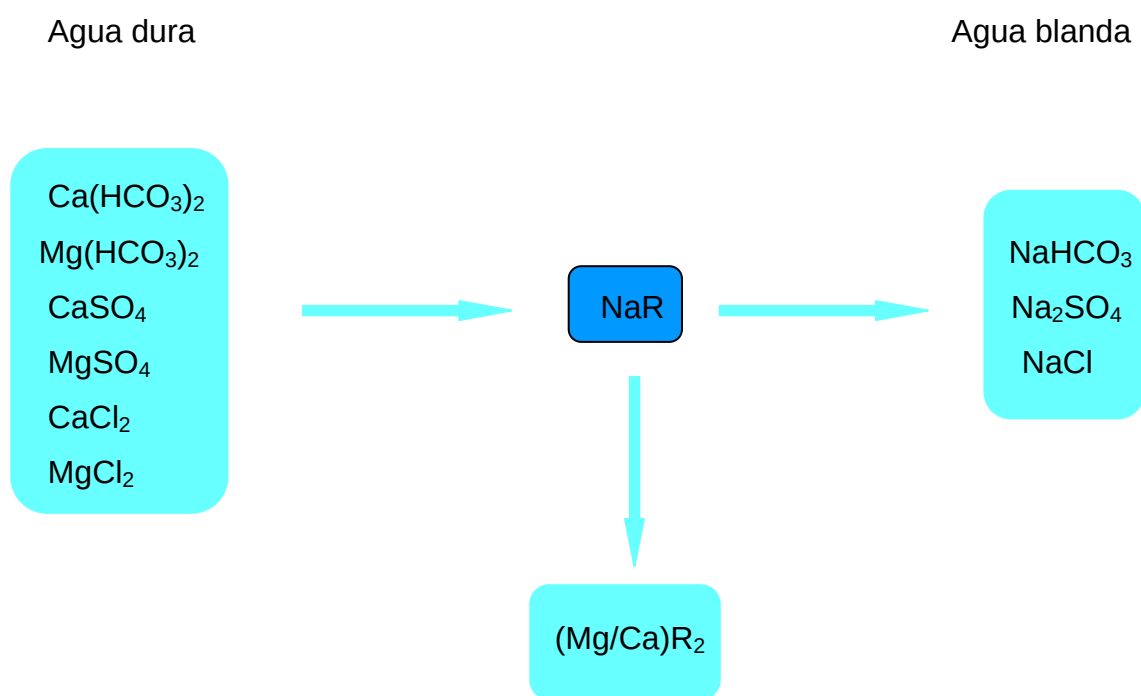
Para ablandar aguas destinadas al uso doméstico se suelen utilizar disoluciones de NaOH o de NH_3 .

Por ejemplo:



- **Ablandamiento por medio de intercambiadores de iones.**

Consiste en hacer pasar el agua dura a través de un lecho especial llamado resina de intercambio iónico que tiene la propiedad de permutar los iones Na^+ de la resina por los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , por tanto todas las sales del agua tratadas se transforman en sales de sodio.

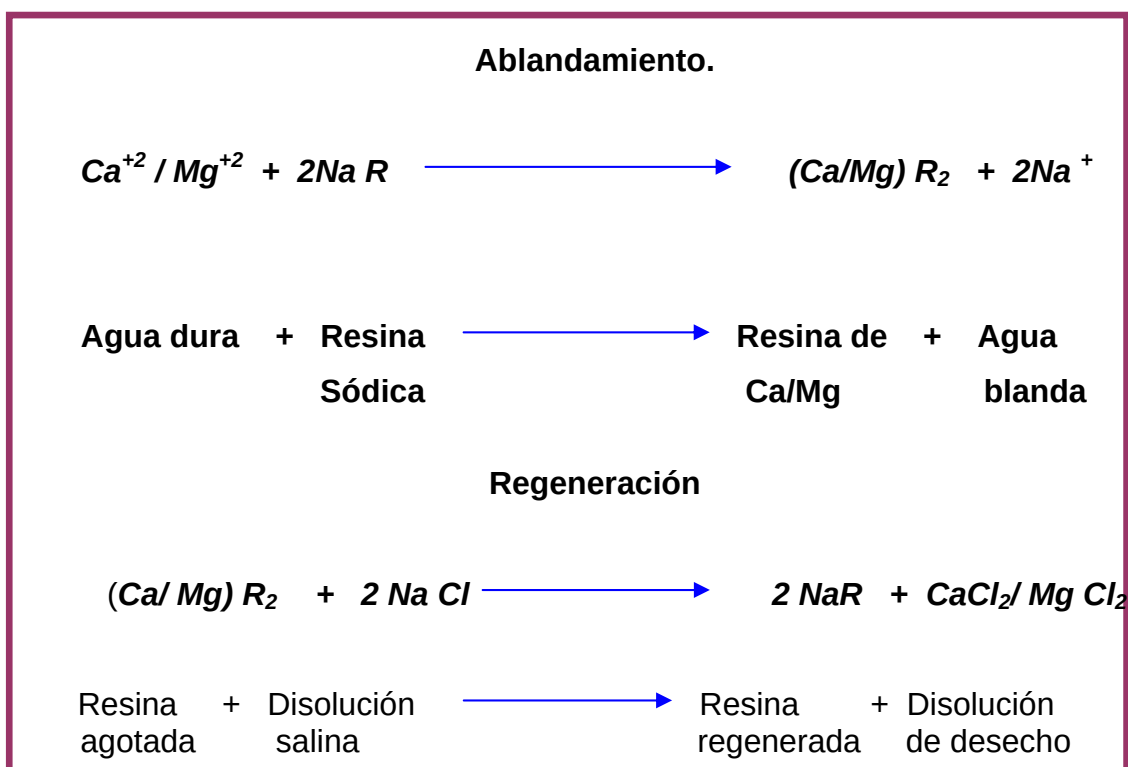


Es decir:





Cuando la mayor parte de los iones sodio de la resina han intercambiado, la resina se agota por haberse convertido en resina cálcica o magnésica. Sin embargo, se puede regenerar tratandola con una disolución de NaCl que produce el intercambio del ión sodio por dos iones Ca^{+2} y Mg^{+2} de la resina. En definitiva la regeneración consiste en desplazar el equilibrio anterior hacia la izquierda. Las sales de Ca y Mg que se forman en la regeneración se eliminan con las aguas de desecho. Existen las resinas de intercambio de aniones pero no son tan estables como los catiónicos. Las resinas más usadas son las zeolitas naturales (silicatos de aluminio y sodio), aunque se utilizan también algunas resinas orgánicas. En resumen, los procesos son los siguientes:



Desalinización. -

En muchos países áridos donde normalmente no hay aguas superficiales y los suministros de aguas subterráneas son inadecuados la desalinización es el único método de abastecimiento de agua. Para llevar a cabo la potabilización se han desarrollado muy diversos sistemas y procesos, todos ellos buscando un mayor abaratamiento del agua producida. En general podemos agruparlos en tres grandes grupos:

- Los basados en la destilación.
- Los basados en la filtración o de membranas.
- Los basados en la congelación.

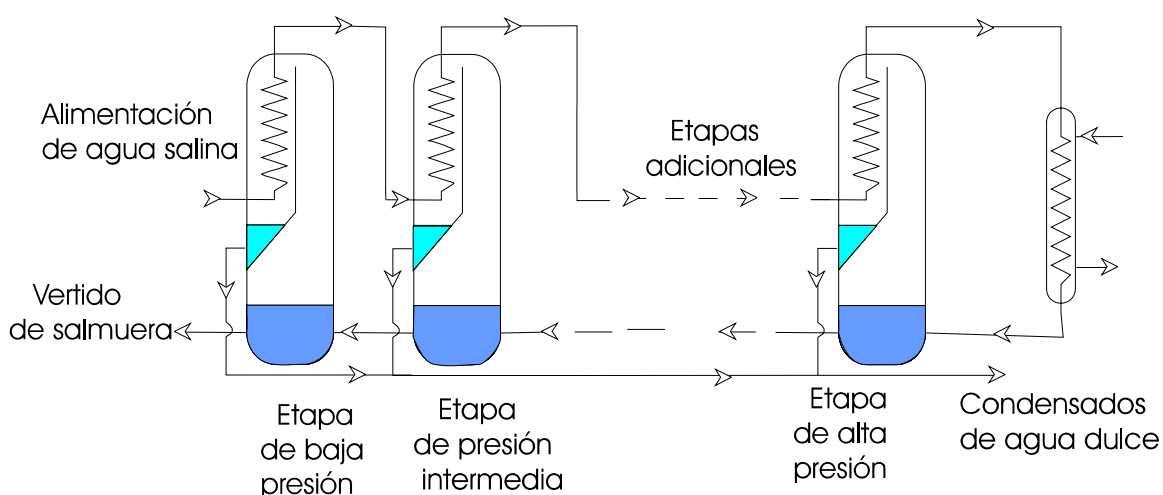
- **Destilación. -**

El método más antiguo de desalación del agua de mar implica la evaporación del agua y la condensación del vapor de agua pura. De todos los procesos de destilación, los más frecuentes son: **evaporación instantánea multietapa o MSF**, el de **evaporación multiefecto** en tubos horizontales o **ME** y el de **compresión de vapor o CV**, ya que el resto de los procesos, o son muy obsoletos, o están en fase experimental, o consisten en procesos híbridos mezcla de anteriores. La fuente de energía es diferente para cada tipo de proceso, así el de MSF y ME necesitan de una fuente calorífica y de energía eléctrica para mover los motores de las bombas del proceso. Este tipo de instalaciones está especialmente indicada para obtener grandes cantidades de agua potable. En cambio el proceso de compresión de vapor CV suele consumir, preferentemente, energía eléctrica y está especialmente indicado cuando se pretende obtener agua de gran calidad (agua destilada) y en pequeñas cantidades, inferior a 3000 m³/día.

El proceso de destilación en una **planta múltiples etapas o multi-flash o MSF** es el siguiente: El agua de mar, que constituye la alimentación, se precalienta circulando como fluido refrigerante en los condensadores del vapor

producido. Una vez precalentado, entra en la primera cámara encontrando en ella una presión inferior a la que corresponde al equilibrio líquido – vapor a la temperatura a la que se encuentra, sufriendo una evaporación instantánea.

El agua salina pasa a las sucesivas cámaras las cuales operan a presiones superiores que la de la cámara previa asegurando que se producirán las posteriores evaporaciones instantáneas. El agua dulce se recoge como agua potable mientras que el residuo concentrado de salmuera tiene que ser cuidadosamente vertido de nuevo al mar. En la figura siguiente se indica el esquema de funcionamiento de una planta de destilación relámpago o multi-flash.



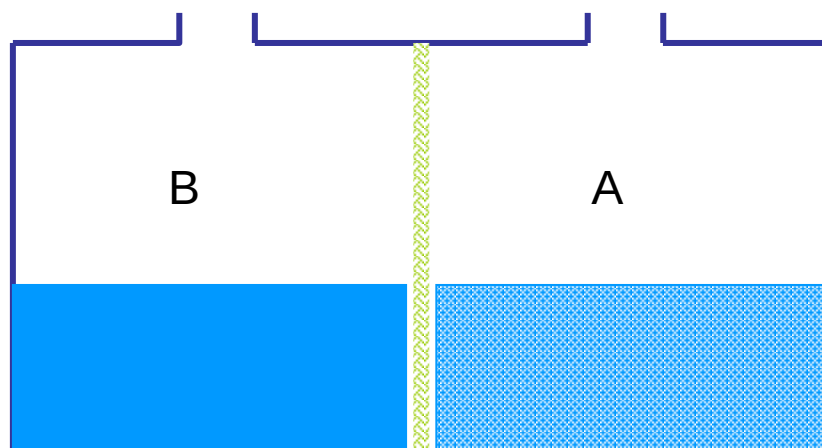
El número óptimo de etapas se estima en 33. En San Diego (California) hay una planta de este tipo con 26 etapas para una capacidad de 3800 m³/día produciendo un agua dulce con 33 ppm y una salmuera residual de 70000ppm.

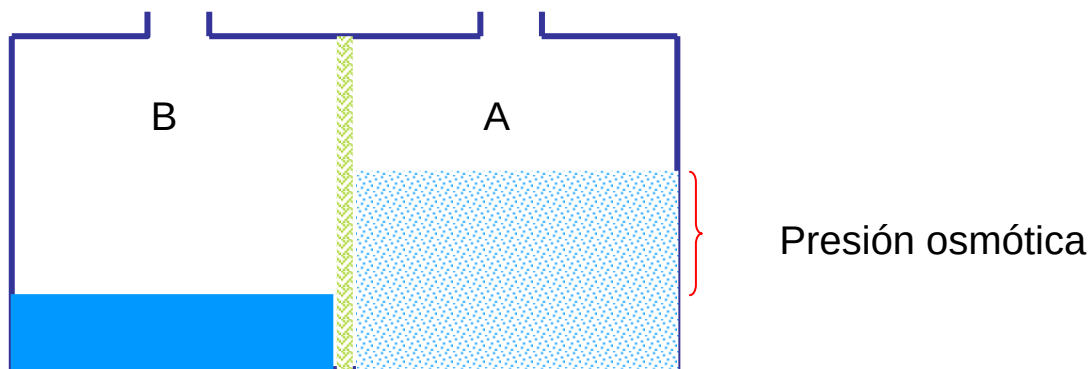
Fenómeno de ósmosis. -

La ósmosis es el traspaso de agua (u otro disolvente) desde una disolución diluida a una disolución concentrada a través de una membrana semipermeable, que permite el paso de las moléculas del disolvente pero impide el paso de las moléculas de soluto. Por tanto, si la membrana se coloca entre agua dulce y agua salada, el disolvente (agua pura) se moverá a través de la membrana hasta que la concentración de sal en ambos compartimentos se iguale. El movimiento del agua a través de la membrana está producido por la diferencia de presión y continúa hasta que la presión en ambas soluciones se iguale limitando el paso posterior.

B = Compartimento de agua dulce.

A = Compartimento de disolución acuosa de sales minerales.

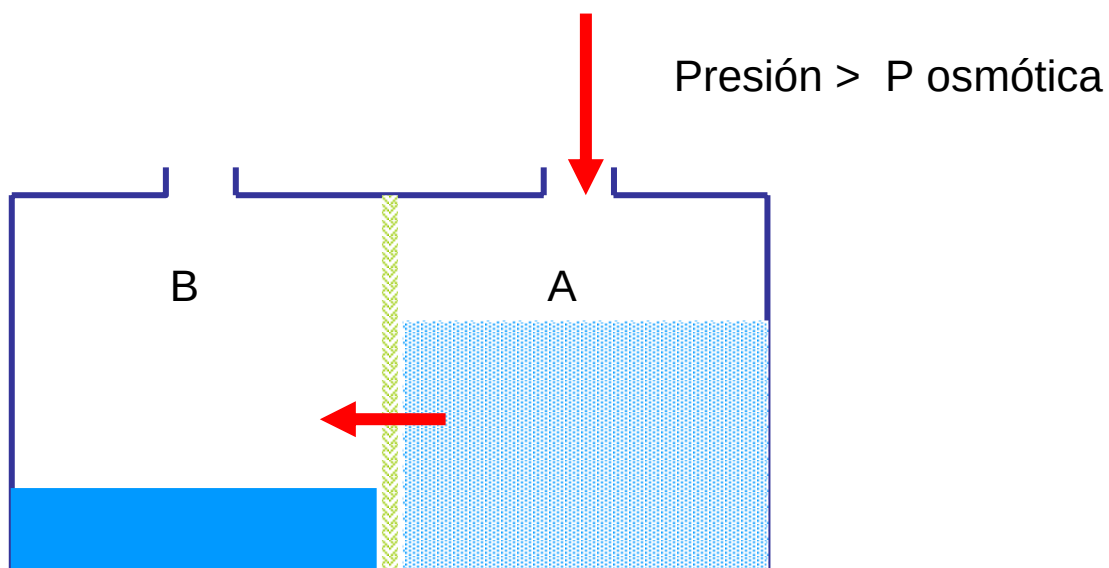
Osmosis natural o directa.



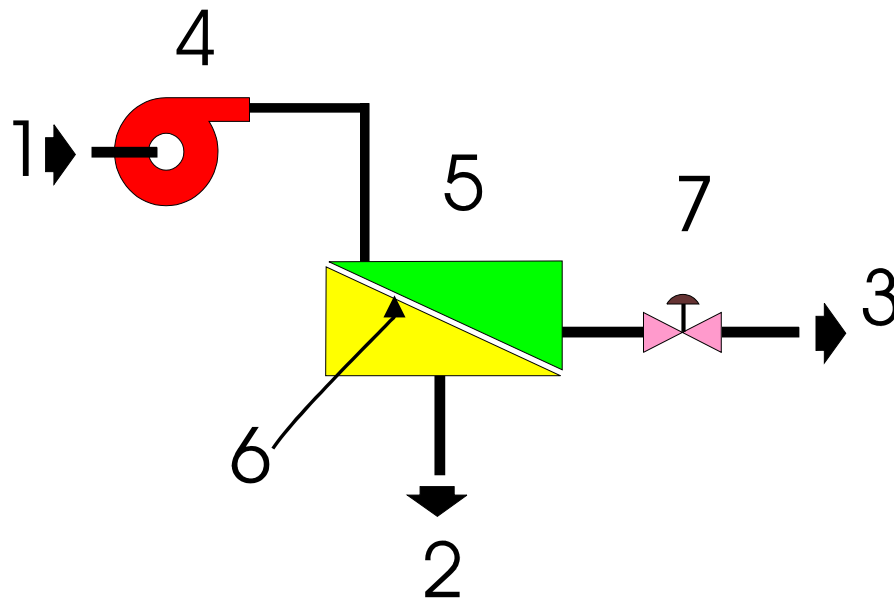
La ósmosis natural o directa se traduce en una transferencia de agua pura desde el compartimento B hacia A. El nivel asciende en el compartimento A hasta que la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido anula el flujo de agua pura; se ha alcanzado el equilibrio osmótico y el valor de esta presión se llama presión osmótica de la solución A.

- **Ósmosis inversa.** -

Si se aplica sobre la disolución salina una presión hidrostática superior a la presión osmótica el agua circula en sentido inverso al anterior quedando las sales retenidas en la membrana. Este fenómeno es la ósmosis inversa.



Esquema simplificado del funcionamiento de una unidad de ósmosis inversa.



1. Agua salada.
2. Agua desalinizada.
3. Vertido concentrado de salmuera.
4. Bomba de alta presión.
5. Módulo de ósmosis.
6. Membrana semipermeable.
7. Válvula de expansión.

Se utilizan unidades con etapas múltiples, obteniéndose los mejores resultados con agua salobre en lugar de agua marina. Aunque es cara la ósmosis inversa también se puede utilizar para ablandar el agua.

Las membranas semipermeables dejan pasar el agua y retienen entre el 90-99% de los elementos minerales disueltos; del 95-99% de los elementos orgánicos y el 100% de las materias coloidales más finas (bacterias, virus, sílice coloidal...). En la actualidad se comercializan dos tipos de membranas:

- Acetato de celulosa (mezcla del mono, di y triacetato), y se suelen utilizar en forma tabular, en forma plana arrollada en espiral y más recientemente en forma de fibras huecas.
- Membranas de poliamidas aromáticas, se fabrican en forma de fibras huecas, y son más resistentes a los agentes químicos y biológicos que las de acetato, cuya hidrólisis no se puede evitar pero se pueden reducir al mínimo respetando las condiciones de explotación en lo referente al pH a la temperatura.

Condiciones	Poliamida aromática B –9 (fibras huecas)	Acetato de celulosa (espiral o fibras huecas)
Presión normal de funcionamiento.	28 bar.	30 – 42 bar.
Temperatura máxima de funcionamiento	35 °C	30 °C
pH tolerados	4 – 11	4,5 – 6,5
Hidrólisis	Insensible	Muy sensible
Ataque bacteriano	Insensible	Muy sensible
Duración	3 a 5 años	2 a 3 años

A modo de ejemplo, la Planta Desaladora de Agua de Mar del Sureste de Gran Canaria utiliza el sistema de Ósmosis Inversa. El procedimiento es el siguiente: El agua de mar se capta a través de 7 pozos de unos 50 m de profundidad, situados dentro de un edificio a unos 100 metros lejos del mar. Esta agua, que ha sufrido una filtración natural desde el mar hasta los pozos, es enviada por cuatro bombas hacia tres filtros de arena. Estos retienen las partículas en suspensión que pueda llevar el agua. Durante todo este tiempo el agua es sometida a sucesivos tratamientos químicos, con hipoclorito sódico, para garantizar su esterilidad y a continuación es enviada mediante tres turbobombas,

una de ellas de reserva, a través de las membranas semipermeables. Los datos técnico se indican en la siguiente tabla.

Datos técnicos de la desaladora de agua de mar del sureste de Gran Canaria.

SISTEMA	ÓSMOSIS INVERSA
<i>Producción</i>	11000 m³/día
<i>Tipo de membranas</i>	Poliamidas aromáticas en espiral
<i>Número de membranas</i>	1056
<i>Aprovechamiento del proceso</i>	41%
<i>Salinidad del agua de mar en la entrada</i>	37500 mg/l
<i>Salinidad del agua producto</i>	400 mg/l
<i>Presión a la entrada</i>	65 Kg/cm²
<i>Pérdida de carga</i>	1,5 Kg/cm²
<i>Temperatura entrada</i>	23,5°C
<i>Caudal de entrada</i>	550 m³/h
<i>Caudal de salida</i>	230 m³/h
<i>pH entrada</i>	6,95
<i>pH salida</i>	6,00
<i>pH distribución</i>	7,3

Fenómeno de Diálisis. -

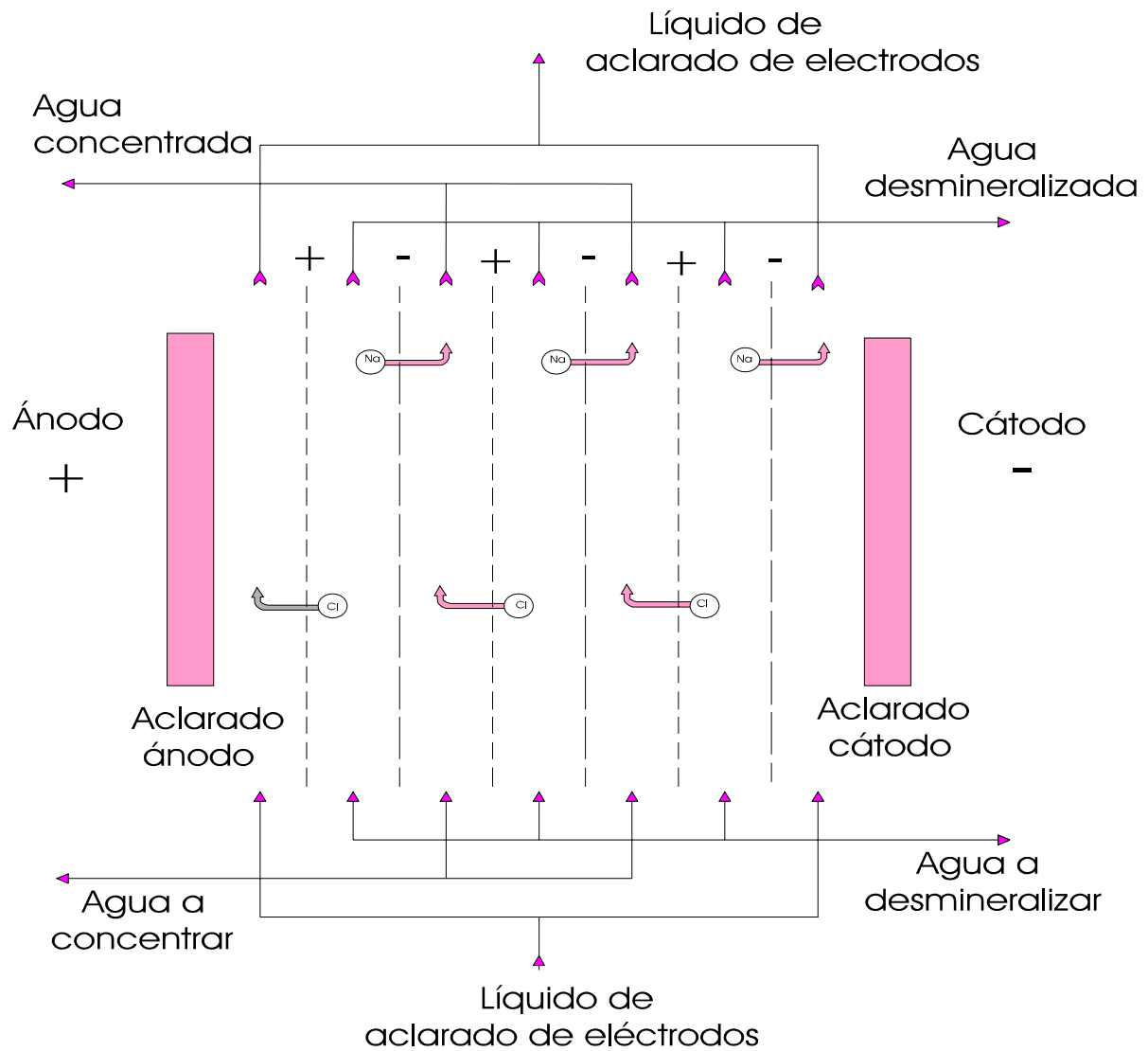
Al contrario que las membranas semipermeables, una membrana de diálisis es **impermeable al agua**, mientras que permiten las transferencias de todas las especies ionizadas o solamente las de un determinado signo (cationes para las membranas catiónicas y aniones para las membranas aniónicas), debido a la diferencia de potencial químico entre las disoluciones que bañan sus dos caras. Esta diferencia de potencial químico se puede provocar por:

- Una diferencia de concentración: **diálisis simple**.
- Una diferencia de presión: **piezodiálisis**.
- Una diferencia de potencial eléctrico: **electrodiálisis**.

Fundamento de la electrodiálisis. –

Si un líquido rico en iones es sometido a la acción de un campo eléctrico por medio de dos electrodos entre los que se aplica una diferencia de potencial constante; los cationes se desplazan hacia el electrodo negativo o cátodo y los aniones al electrodo positivo o ánodo. Si nada se opone a su movimiento descargan sobre los electrodos de signo contrario y se produce la electrólisis. Pero, si se coloca entre los electrodos un conjunto de membranas de diálisis selectiva; unas negativas, permeables únicamente a los cationes y otras positivas, permeables sólo a los aniones, dispuestos alternativamente, se limita la migración de los iones ya que los aniones no pueden atravesar las membranas negativas ni los cationes las positivas.

En el esquema siguiente cuyos compartimentos 1,2,3,4 y 5 se alimentan por una disolución de NaCl, debido a la d.d.p. creada por los electrodos los iones de los compartimentos 1, 3 y 5 pasan a los compartimentos 2 y 4 por lo que el agua de los compartimentos 1, 3 y 5 se empobrecen en sal y en los compartimentos 2 y 4 aumenta la salinidad.



Como el rendimiento de eliminación de sales oscila entre 40-60% por cada paso, la reducción deseada de salinidad se alcanza de forma sucesiva la más usual es en dos pasos o dos efectos o dos etapas en serie.

En resumen, este procedimiento permite una desmineralización del agua, pero por el contrario, las moléculas no ionizadas (especialmente los compuestos orgánicos) y los coloides permanecen en el agua tratada.

Los principales inconvenientes del método son:

- Imposibilidad de conseguir aguas altamente desmineralizadas. Por eso los sistemas están constituidos por dos o más etapas.
- El costo del agua blanda aumenta con la salinidad del agua entrante ya que la potencia consumida es proporcional a la cantidad de sales eliminadas.
- Debe eliminarse previamente el conjunto de sales susceptibles de precipitar en los compartimentos de concentración ya que la sobreconcentración de iones comunes y la modificación del pH (por sobreconcentración local de iones OH^- y H_3O^+) puede reforzar la tendencia a la precipitación de ciertos compuestos.

El principal campo de electrodiálisis es la producción de agua potable a partir de agua salobre poco mineralizada (0'8-2 g/l), campo en el que está en competencia con la ósmosis inversa y, en la desalinización de disoluciones coloidales u orgánicas como por ejemplo desmineralización de sueros. En este caso la ósmosis inversa provocaría la concentración simultánea de todas las especies presentes y produciría agua desmineralizadas, mientras que la electrodiálisis sólo elimina las especies ionizadas.

Desalinización por congelación. -

Es una técnica que lleva varios años desarrollándose pero aunque la tecnología existe, todavía no se ha producido a gran escala. El método está basado en el hecho de que cuando se congela una disolución acuosa (por ejemplo de agua de mar), el sólido que se separa de la disolución es agua casi pura. Así, los cristales de hielo obtenidos a partir del agua de mar congelada podrían decantarse y derretirse para producir agua dulce.

En comparación con la destilación, la ventaja principal es el bajo consumo de energía, solamente necesita entre el 10-15% de la energía necesaria para la evaporación. Es un campo muy atractivo tanto económica como medioambiental.

Las principales desventajas de la congelación están unidas al lento crecimiento de los cristales de hielo y con la eliminación de los depósitos salinos de los cristales.

En la tabla siguiente se reflejan los principales procesos utilizados actualmente en el mundo. De ella se deduce que los basados en la destilación son los que más se han multiplicado. Son los más antiguos y se ha investigado más sobre ellos, produciéndose en consecuencia, un mayor número de configuraciones. Los basados en las membranas y en la congelación son los sistemas más modernos, pero el de congelación no ha tenido en la práctica ningún desarrollo industrial, no habiendo pasado de la fase de planta piloto.

El proceso con mayor número total de plantas instaladas es el de ósmosis inversa, con más del 57% del total. El que mayor capacidad tiene instalada es el Evaporación Instantánea Múltiple etapa o MSF, con el 51% de la capacidad mundial; asimismo este proceso es el de mayor producción unitaria y total por planta.

Gracias al avance, mejora y abaratamiento de las membranas, el proceso de ósmosis inversa está sufriendo un rápido incremento y aceptación para la potabilización del agua de mar.

PROCESOS	NÚMERO DE UNIDADES	CAPACIDAD (m ³ /día)
DESTILACIÓN		
• MSF	1090	7.994.244
• ME	606	727.940
• CV	702	584.629
• Otros	173	304.921
MEMBRANAS		
• Electrodialisis	1159	882.254
• Ósmosis Inversa	5146	5.080.207
CONGELACIÓN		
• Congelación	1	210
TOTAL	8886	15.582.443

Contaminantes del agua.

Un contaminante es cualquier sustancia introducida en el medio acuático, como resultado de la actividad humana, que pueda causar directa o indirectamente efectos adversos sobre el hombre o su entorno. En este apartado vamos a analizar el origen de algunos contaminantes y sus efectos.

- **Sólidos en suspensión.-**

Entre los contaminantes sólidos se incluyen materiales como: arena, arcilla, tierra, cenizas, desechos sólidos, material vegetal, basura, papel, plásticos, etc. Los sólidos en suspensión puede tener efectos nocivos sobre las plantas acuáticas ya que al disponer de menos luz se limita su desarrollo reduciendo de esta forma el alimento que para los peces ellas constituyen. Si los sólidos

se depositan en el lecho pueden producir la muerte por asfixia de los organismos acuáticos que viven en el fondo. También producen efectos indeseables en la obstrucción o relleno de lagos, embalses y canales, corrosión de equipos e interferencia en los procesos industriales.

- **Contaminación térmica.-**

Consiste en la descarga de agua caliente en masas de agua. Proceden de los sistemas de refrigeración usados en las industrias y centrales generadoras de energía. Producen incrementos de la temperatura del agua por encima de los niveles normales que puede ejercer efectos perjudiciales sobre la vida acuática. Las temperaturas elevadas disminuyen la solubilidad del oxígeno, al mismo tiempo que producen un aumento de su actividad metabólica.

- **Organismos patógenos.-**

Incluyen bacterias y virus que producen enfermedades. Proceden de las aguas residuales (fecales) y de los vertidos de ciertas industrias (mataderos), desechos de animales etc.

El contacto de estos puede efectuarse por ingestión directa del agua o de alimentos de origen acuático o mediante el baño en aguas contaminadas

Los virus indeseables producen enfermedades tales como la hepatitis viral y la poliomielitis. Mientras que las bacterias (que es el grupo más importante en cuanto a su frecuencia de detección en el agua potable) producen. cólera, tuberculosis, fiebres tifoideas, disentería bacteriana etc.

- **Nutrientes minerales.-**

Principalmente a los compuestos inorgánicos de fósforo y nitrógeno. Las aguas residuales domésticas e industriales, las escorrentías de los suelos

cultivados, el arrastre de fertilizantes y las deposiciones atmosféricas constituyen fuentes de aportes de nutrientes. El exceso de aporte de nutrientes produce la **eutrofización** (del griego = bien alimentado) en las aguas con los problemas que lleva asociado el excesivo crecimiento de las algas, que se llama **“florecimiento de las algas”** y se convierten en enormes masas visibles de algas flotantes sobre las playas y costas.

La eutrofización constituye un proceso natural de envejecimiento en el que el lago sobrealimentado acumula grandes cantidades de material vegetal en descomposición en su fondo, esto tiende a llenar el lago y se convierte poco a poco en un pantano y posteriormente en un prado o en un bosque. Este proceso de envejecimiento natural ocurre en cientos de años, pero el exceso de nutrientes acelera la eutrofización y de hecho en sólo algunas décadas los desechos han provocado el envejecimiento definitivo de algunos lagos.

También el crecimiento desmesurado de las algas y plantas acuáticas produce la aparición de color y sabor en el agua, degradación de su transparencia y cuando mueren (las algas y plantas) su descomposición consume el oxígeno disuelto y esto puede ocasionar la muerte de los peces y otra clase de vida acuática. Simultáneamente durante el crecimiento desmesurado de las algas se liberan toxinas que pueden matar el ganado, animales domésticos e incluso peces y aves que han bebido el agua contaminada.

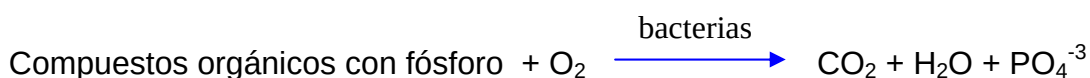
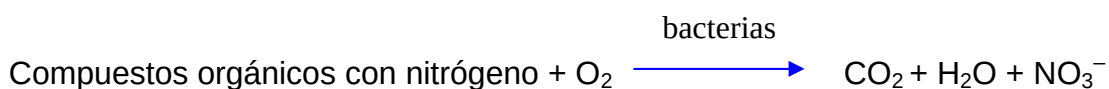
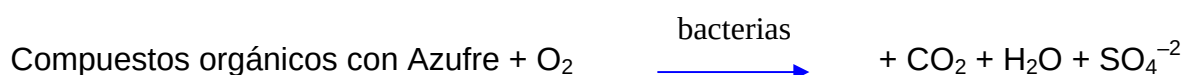
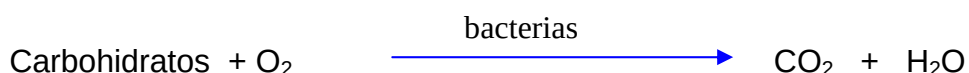
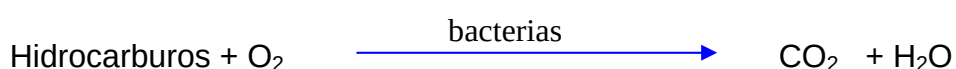
- **Contaminantes que demandan oxígeno. -**

Son compuestos orgánicos biodegradables aportados a las aguas por vertidos domésticos e industriales. Estos contaminantes se descomponen debido a procesos químicos que se producen en el agua y se conocen como contaminantes **“degradables” o “biodegradables”**.

La degradación se refiere a la separación en sustancias más simples y la mayoría de los contaminantes orgánicos son degradables. La descomposición de materiales orgánicos en el agua se produce por la acción de las bacterias y otros organismos presentes en ella, que utilizan los compuestos orgánicos

como alimentos y fuentes de energía para los procesos de oxidación biológica. En este proceso de descomposición bacteriana se consume el oxígeno disuelto y se produce dióxido de carbono, agua y varias especies no degradables.

A continuación se exponen algunas reacciones generales que indican la descomposición bacteriana de los compuestos orgánicos en presencia de oxígeno; este tipo de descomposición se llama **aeróbica** (vida).



Todas las reacciones señaladas consumen el oxígeno disuelto en el agua, y a estos compuestos orgánicos que sufren la descomposición aeróbica se les llama **“contaminantes reductores de oxígeno”**. Este consumo de oxígeno puede acarrear la muerte de los peces. El consumo de oxígeno realizado en una corriente de agua por los organismos aeróbicos se llama demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

La DBO_5 se expresa en ppm y en mg/l y se calcula midiendo la reducción, en un periodo de cinco días por acción bactericida, del oxígeno disuelto en una muestra de 1 litro de agua mantenida a 20 °C. Es un parámetro indicativo del nivel de contaminación del agua. Se considera que:

Si $\text{DBO}_5 \leq 20 \text{ mg/l}$ tenemos un agua poco contaminada.

Si DBO_5 oscila entre 20 – 50 mg/l tenemos un agua entre los límites de peligrosidad. Se recomienda una $\text{DBO}_5 \leq 10$ mg/l.

La DQO (Demanda Química de Oxígeno) mide la oxidabilidad de la materia orgánica en un proceso puramente químico en lugar de biológico. Se expresa en mg/l y se utiliza cuando se analizan efluentes industriales mientras que la DBO se utiliza para aguas residuales urbanas.

Cuando el volumen de oxígeno en el agua es insuficiente se puede seguir produciendo la descomposición bacteriana de casi todos los compuestos orgánicos, pero esa descomposición en ausencia de oxígeno ya no produce las mismas sustancias. Se llama **descomposición anaeróbica** (sin oxígeno) y el proceso general es:

Compuestos orgánicos



Los gases sulfhídrico y metano aportan al agua mal olor y sabor. Esta descomposición es la principal fuente de metano y sulfuro de hidrógeno naturales en la atmósfera. Una vez en ella el metano se transforma en CO_2 y el SH_2 en sulfato debido a las reacciones químicas atmosférica.

- **Contaminantes no degradables.-**

Existen algunos compuestos orgánicos como plaguicidas y detergentes que no son degradables o se descomponen con una gran lentitud. Se les conocen como compuestos orgánicos duros o refractarios. Además de los orgánicos duros están en este grupo los metales pesados como plomo, mercurio, cadmio, cinc, cobalto, manganeso, cobre y los iones nitratos, fosfatos y sulfatos.

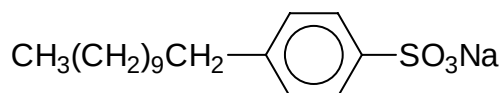
Detergentes.

Compuestos tensoactivos sintéticos cuya presencia en el agua se debe a vertidos urbanos e industriales. La mayoría de los detergentes usados son sales sódicas del sulfonato de benceno.

Durante mucho tiempo se utilizaron los productos duros o poco biodegradables, de cadena ramificada (que los hace más resistentes a la descomposición) como los alquilbenceno sulfonatos (ABS) que eran responsables de los problemas planteados por la presencia de detergentes en las aguas.

Actualmente la mayoría de los detergentes son alquilbenceno sulfonatos de cadena lineal llamados sulfonatos lineales de alquilo (LAS) que si son biodegradables.

Por ejemplo:



Y el agente ablandador introducido en los detergentes es el tripolifosfato de sodio ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$), donde el ión tripolifosfato ($\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$) es un eficiente agente quelante con los iones calcio y magnesio formando complejos estables por lo que los detergentes son solubles en aguas duras.

Un detergente típico de lavandería contiene 18 % de LAS; 50 % de tripolifosfato y el resto llenadores inertes (blanqueadores, perfumes etc.)

Son biodegradables pero los efectos contaminantes de los detergentes son:

1. Formación de espumas que paralizan los procesos de depuración natural o artificial.
2. Disminución de la solubilidad del oxígeno en las aguas que tienen detergentes.
3. Aumento del contenido en fosfato en las aguas de desecho que favorece el proceso de la eutrofización.

Se están realizando grandes esfuerzos para encontrar un sustituto de los fosfatos en los detergentes.

- **Plaguicidas.-**

Son productos químicos, destinados a luchar contra los parásitos tanto animales como vegetales; que constituyen las plagas. La contaminación se debe a las aguas de lluvias y a las aguas de infiltración. Como son muy resistentes a la degradación física o bioquímica (el DDT sólo se degrada en 10 años un 50% de su masa inicial) pasan a la cadena alimentaria.

Sus principales efectos son:

1. Causan malos olores y sabores en las aguas.
2. Efectos tóxicos sobre la fauna acuática.
3. Efectos tóxicos sobre el hombre (el hígado, los riñones y el sistema nervioso son sensibles al D.D.T.)

Existen cuatro grupos de pesticidas: organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretrinas.

Organoclorados.-

Atacan al sistema nervioso central. Entre ellos destacamos:

DDT ($C_{14}H_9Cl_5$): Neurotóxico (actualmente está prohibido)

Lindano ($C_6H_6Cl_6$): Propiedades cancerígenas.

Dieldrín ($C_{12}H_4OCl_6$): Neurotóxico y cancerígeno.

Endrín ($C_{12}HOCl_6$): Neurotóxico y cancerígeno.

Aldrín ($C_{12}H_6Cl_6$): Neurotóxico y cancerígeno.

Órganofosforados.-

También atacan al sistema nervioso central pero son menos estables que los anteriores y tienden a sustituirlos. Los más frecuentes son:

Malatión ($C_{10}H_{19}O_6PS_2$): Tóxico cutáneo.

Diazinon ($C_{13}O_3H_{21}PSN_2$): Tóxico cutáneo.

Diclorvos ($C_4O_3H_7PCl_2$): Tóxico cutáneo.

Carbamatos.-

Sustancias de origen natural que también atacan al sistema nervioso central pero más seguros que los anteriores ya que son razonablemente degradables. Aunque mucho más caros se están utilizando con mayor frecuencia. Entre ellos destaca el Aldicarb ($C_7O_2H_{14}SN_2$) que es tóxico por ingestión.

Piretrinas.-

Compuestos de origen natural que se han usado durante mucho tiempo como insecticidas aunque en la actualidad se obtienen de síntesis que son en general, mucho más activos que los naturales. La deltametrina ($C_{22}H_{19}Br_2O_3N$) es uno de los insecticidas sintéticos más activo que se conoce. Son relativamente poco tóxicos y muy empleados por jardineros y se utilizan también como insecticidas domésticos.

A pesar de todos estos problemas ambientales, el panorama no es tan negro. En los últimos 20 años la industria química se ha acercado más que nunca al control de la contaminación ideando procedimientos novedosos para reducir el daño al medio ambiente. El proceso es muy costoso, pero **limpiar nuestra tierra,**

nuestra agua y nuestro aire, es un pequeño precio a pagar, considerando que el futuro del planeta Tierra es el que está en juego.

Tratamiento de aguas residuales. –

Llamamos aguas residuales a los líquidos procedentes de la actividad humana, que llevan en su composición gran parte de agua, y que generalmente son vertidas a grandes masas de aguas continentales o marinas.

Las aguas residuales urbanas presentan tipos de contaminantes muy variados y este hecho impide encasillar las aguas residuales según los tipos de tratamientos específicos. En la tabla siguiente se indican las características del agua bruta de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) del Sureste de Gran Canaria.

Parámetros	Valores Extremos	Valor Medio
<i>PH</i>	7,5 – 8,2	7,8
<i>DBO₅</i>	290 - 930	555
<i>Sólidos en SuspensiónSS(mg/l)</i>	260 – 900	472
<i>Conductividad (μS/cm)</i>	2320 – 3890	2900
<i>Sólidos Totales Disueltos STD (mg/l)</i>	1340 – 2732	1640
<i>NH₄⁺ (mg/l)</i>	48 – 122	94
<i>NO₂⁻ (mg/l)</i>	1,0 – 2,0	0,8
<i>NO₃⁻ (mg/l)</i>	< 0,1 – 11	1,5
<i>DQO (mg/l)</i>	839 – 1800	1270
<i>Ca⁺² (mg/l)</i>	48 – 188	80
<i>Mg⁺² (mg/l)</i>	39 – 144	70
<i>Na⁺ (mg/l)</i>	239 – 470	362
<i>K⁺ (mg/l)</i>	30 – 60	41
<i>Sílice SiO₂ (mg/l)</i>	32 – 68	47

Las aguas residuales están originadas por residuos domésticos, industriales, arrastre de lluvias e infiltraciones. En la gestión de las aguas residuales urbanas se deben tener en cuenta tres factores fundamentales:

1. El primero está relacionado con la calidad del medio ambiente. Las aguas residuales deben ser manejadas de tal forma que no contaminen el aire, suelo y los recursos del agua. Por tanto hay que evitar que se introduzca en su seno productos tóxicos o que puedan plantear problemas patológicos sobre todos en lo referente a las cadenas alimentarias.
2. El segundo elemento está relacionado con la crisis de la energía. Hasta ahora prácticamente se había mirado muy poco el residuo orgánico como una potencial fuente de energía. Actualmente en muchos países existe gran interés en utilizar la biomasa como fuente de energía. En 1981 la biomasa suministró el 3,5 % de los requerimientos energéticos de USA.
3. El tercer factor es la crisis alimentaria. El mundo se está planteando el desequilibrio y la crisis de producción de alimentos en amplias zonas habitadas, lo que hace necesaria la ubicación de áreas productivas en dichas zonas. Por tanto, todo lo que sea aportar materia orgánica y nutrientes a los vegetales implica una mayor producción de alimentos y una mayor posibilidad de conservar los recursos del suelo.

El tratamiento de las aguas residuales, antes de ser devueltas a la hidrosfera (segunda parte del ciclo de agua de consumo), se realiza generalmente, en tres etapas o pasos que se conocen como tratamiento primario, secundario y terciario. El principal objetivo del tratamiento de las aguas negras es reducir la DBO de las aguas de desecho.

Cerca del 30 % de las aguas residuales reciben tratamiento primario, en tanto que alrededor del 60 % es sometido a tratamiento secundario. En la actualidad se aplican muy pocos tratamientos terciarios a las aguas residuales (es muy costoso) y el tratamiento secundario se puede encarecer hasta el doble del primario.

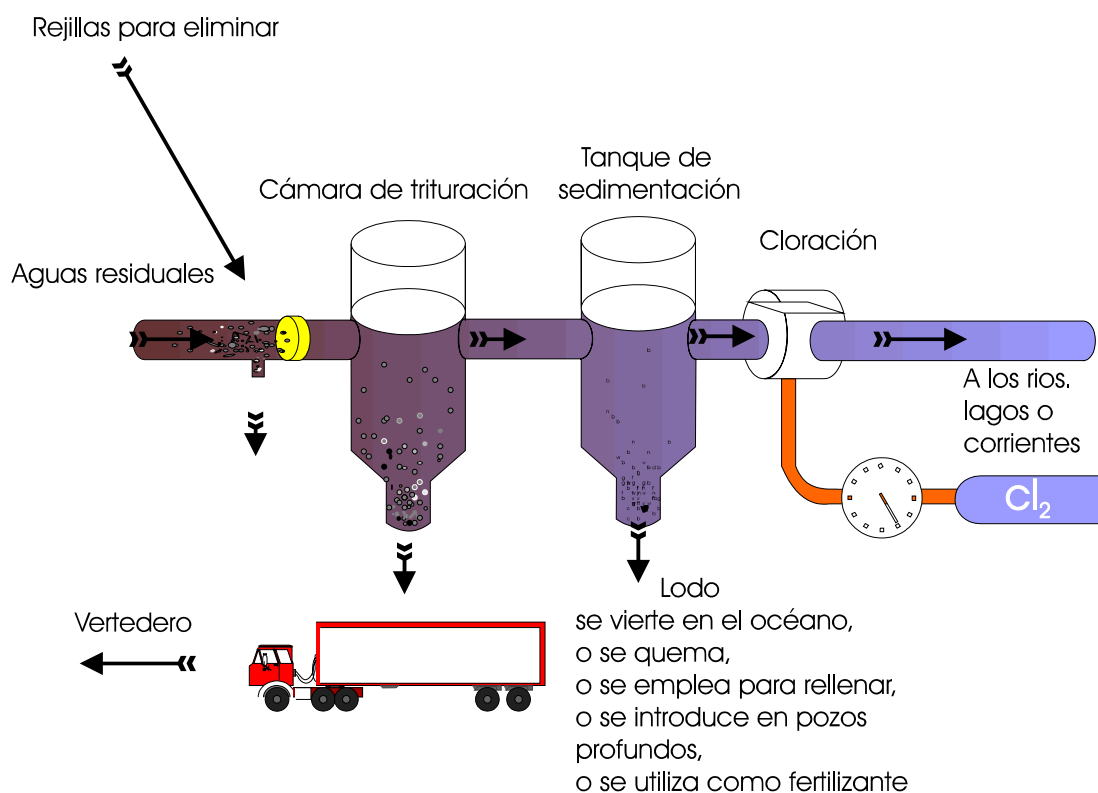
Tratamiento primario.

A medida que el agua entra en la planta se le hace pasar a través de una criba de barras para separar los objetos grandes. En algunas plantas se cuenta con trituradoras grandes que pulverizan los objetos mayores de tal manera que puedan pasar a la etapa de tratamiento.

Seguidamente, las aguas negras fluyen con lentitud a través de una gran cámara en donde se sedimenta arena, piedras y otros materiales pesados. De ésta cámara las aguas residuales fluyen a enormes tanques de asentamiento o sedimentación y los sólidos suspendidos se sedimentan en la base (como lodo de aguas negras) mientras que las grasas y los aceites flotan en la parte superior en forma de espuma (se suele añadir alumbre para facilitar la coagulación).

El agua que queda entre el lodo y la espuma se escurre y libera al ambiente; o bien se le hace pasar al tratamiento secundario. En algunas ocasiones, el agua es sometida a cloración (para matar las bacterias) antes de liberarla al medio ambiente.

Al finalizar el tratamiento primario entre un 40 – 60 % de sólidos en suspensión y un 25 – 35 % de los desechos que requieren oxígeno, han sido eliminados.



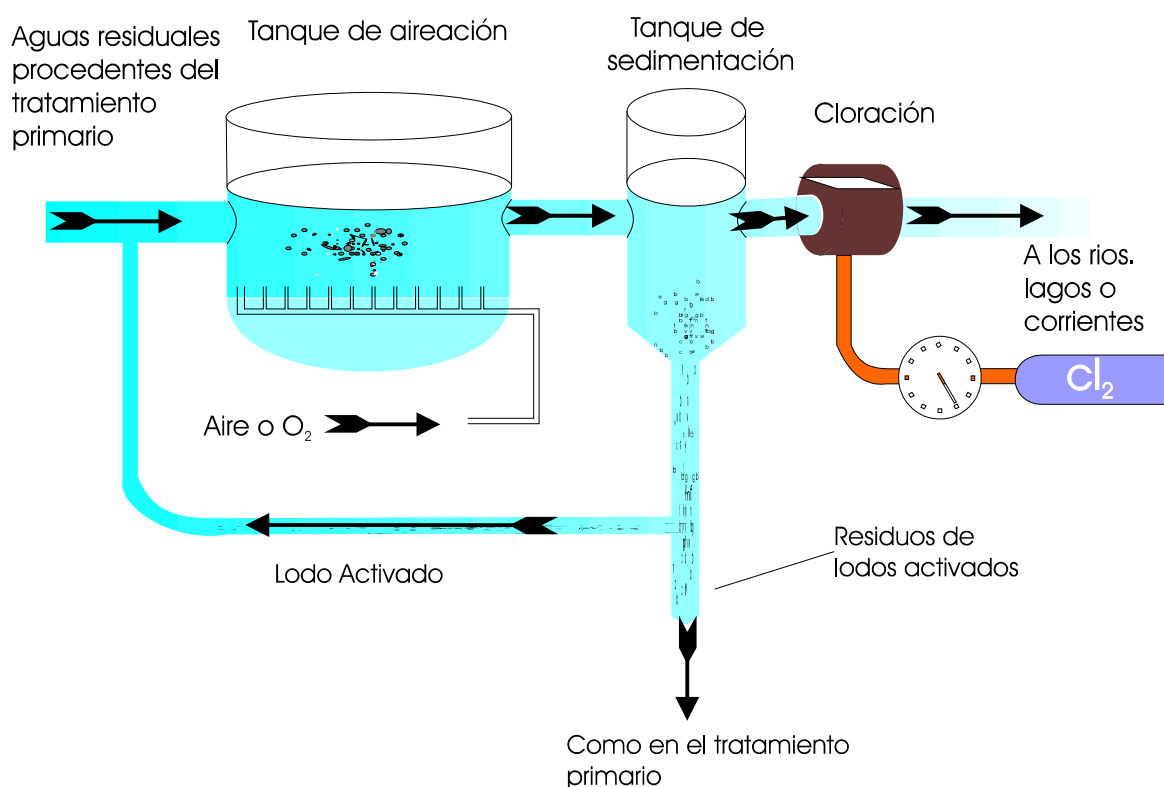
Tratamiento secundario.

El tipo más común de tratamiento secundario es el de los **lodos activados**. Las aguas negras procedentes del tratamiento primario llegan a un tanque de aireación en donde el aire se hace pasar en burbujas a través de él (en algunas plantas se utiliza oxígeno puro). La aireación de las aguas negras produce un rápido cultivo de bacterias aeróbicas que utilizan el oxígeno para descomponer los desechos orgánicos de las aguas negras. Los sólidos suspendidos mezclados con las bacterias forman un lodo que se llama lodo activado.

Las aguas residuales tratadas que proceden del tanque de aireación se hacen pasar a otro tanque de asentamiento donde los lodos activados sedimentan en el fondo. El lodo activado que se acumula en el fondo se transfiere de nuevo al tanque de aireación mezclado con las aguas negras que se están recibiendo.

El exceso de lodos, se recoge, trata y elimina. La eliminación de lodos de las aguas residuales constituye un problema muy importante porque las plantas de tratamientos producen grandes cantidades de lodos que se deben eliminar en forma de desechos sólidos. Una parte se utiliza como fertilizante; pero la mayor proporción se debe sepultar en un relleno de tierra o incinerar. Se deben tomar precauciones con el vertido de los lodos debido a su peligro potencial para transmitir patógenos. Después del tratamiento secundario se acostumbra a someter el agua de desecho a un proceso de cloración antes de liberarla al medio ambiente.

El tratamiento primario seguido del secundario elimina aproximadamente el 90% de los sólidos suspendidos y cerca del 90% de los desechos que necesitan oxígeno.



Tratamiento terciario.

Cualquier tipo de tratamiento siguiente a la etapa secundaria se llama tratamiento terciario o específico. Después del tratamiento primario y secundario se han eliminado los residuos sólidos; el objetivo de éste es eliminar los contaminantes orgánicos, los nutrientes (fosfatos y nitratos) o cualquier exceso de sales minerales con la finalidad de que el agua de desecho sea tan pura como sea posible antes de devolverla al medio ambiente. Existen varias clases de tratamientos terciarios o avanzados: Eliminación de los nutrientes; Tratamiento Físico-Químico; Ósmosis Inversa; Adsorción del Carbono; Electrodialisis etc.

Eliminación de los nutrientes.

- Un método avanzado para suprimir los fosfatos y los iones inorgánicos positivos es utilizando **resinas de intercambio iónico**. Está basado en el mismo principio del intercambio iónico que se utiliza para el ablandamiento del agua. La diferencia reside en que se emplean distintos tipos de resinas.

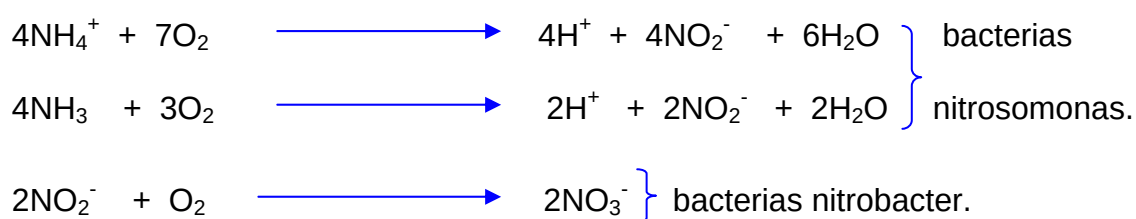
El procedimiento es el siguiente: En primer lugar, se hace pasar el agua a través de un lecho de resina de intercambio de cationes, donde los iones positivos del agua se intercambian por los iones H^+ de la resina. El agua que sale de ésta contiene una mezcla de aniones e iones H_3O^+ formados por la hidratación de los iones H^+ . El agua pasa a continuación a través de un lecho de resina de intercambio de aniones donde los iones negativos del agua se intercambian con los iones OH^- de la resina. Los iones hidróxido se combinan con los iones hidronio para formar agua:



Por lo tanto, el uso del intercambio permite sustituir por agua los iones minerales inorgánicos. El intercambio iónico se suele emplear para desmineralizar el agua en un 90%. Las resinas se regeneran haciendo pasar ácido sulfúrico por la resina de cationes y disolución de amoníaco por la resina de aniones. No es útil para los nitratos.

- El nitrógeno en las aguas residuales se suele presentar en forma de NH_3 y NH_4^+ procedentes de la descomposición del nitrógeno orgánico. Es más difícil eliminar los nutrientes nitrogenados que los fosfatos.

Un método consiste en usar las bacterias desnitrificantes para convertir el ión amonio en nitrito por la acción de las bacterias nitrificantes del género nitrosomonas, haciendo pasar el agua lentamente a través de un lecho que contiene las bacterias. El proceso de nitrificación se lleva a cabo en dos etapas, llevadas a cabo por dos especies de bacterias, mediante reacciones de oxidación:



El producto final de la oxidación es el ión nitrato, el cual es la forma en la cual el nitrógeno es asimilado para formar aminoácidos y proteínas.

En el ciclo completo los iones nitrato y nitrito son convertidos por la acción bacteriana, proceso llamado desnitrificación, en nitrógeno gaseoso que es liberado a la atmósfera.

Con respecto a la Adsorción del Carbono indicar que es el método terciario más prometedor para eliminar la materia orgánica disuelta pero es muy caro. Mientras que la Electrodialisis y Ósmosis Inversa se utilizan para la desmineralización del agua (eliminación de los iones inorgánicos disueltos). Estos tres últimos procesos han sido estudiados anteriormente.

La EDAR del Sureste de Gran Canaria, trata las aguas residuales de los municipios de Agüimes, Ingenio y Santa Lucía de Tirajana, con una población de 82000 habitantes, y diversas industrias ubicadas en la zona. Se encuentra en funcionamiento desde 1994, y su línea de tratamientos es la siguiente:

Línea de Agua

- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Tratamiento terciario.

Línea de Fangos

- Espesamiento de fangos primarios por gravedad.
- Espesamiento de fangos biológicos por flotación.
- Digestión anaeróbica de fangos.
- Secado de fangos.
- Almacenamiento de gas en campana gasométrica de baja presión.

Con la finalidad de poder reutilizar el agua para la agricultura en esta estación depuradora se desarrolla actualmente el proyecto de investigación Demostración en Reutilización de Aguas (DEREA) cuyos objetivos son conseguir los límites de calidad requeridos, que para el caso de Canarias, fundamentalmente son los siguientes:

- Reducción de la concentración de materia orgánica DBO_5 , hasta conseguir límites inferiores a 10 mg/.
- Reducción de la materia en suspensión hasta límites inferiores a 10 mg/l de SS.
- Reducción de la salinidad hasta límites inferiores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad.
- Reducción de la contaminación bacteriana hasta límites inferiores a 10/100 ml de Coliformes Fecales y 100/100 ml de Coliformes totales.

Para ello, las investigaciones del proyecto DEREa han utilizado las siguientes unidades piloto: Tratamiento por Ósmosis Inversa y Electrodíalisis Reversible. A continuación se indican los parámetros de operación y los resultados obtenidos en ambos procesos.

Resultados del Tratamiento Terciario por Ósmosis Inversa.

Parámetros de operación.

Caudal de alimentación 3700 – 4100 l/h.

Caudal de salida 2400 – 2900 l/h.

Presión de alimentación 25 – 29 Kg/cm²

Pérdida de carga 2 – 3 Kg/cm²

Membranas de acetato de celulosa arrolladas en espiral (18) y distribuidas en tres tubos.

Ácido sulfúrico (para disminuir el pH debido a la alta alcalinidad de las aguas tratadas), hexametáfosfato sódico (para evitar la precipitación de sales) e hipoclorito sódico (como desinfectante).

Los resultados del proceso se indican en la tabla siguiente:

Parámetros	Agua de Alimentación (Valor medio)	Agua Producto (Valor medio)	Eliminación
pH	5,4	5	-----
Conductividad (μS/cm)	3110	156	95%
STD (mg/l)	2030	99	95%
NH₄⁺ (mg/l)	38	3,6	91%
NO₃⁻ (mg/l)	39	7,1	82%
PO₄⁻³ (mg/l)	54	3,8	93%
SiO₂ (mg/l)	47	5,3	89%
DBO₅ (mg/l)	3	0,5	83%
DQO (mg/l)	74	15	80%

Resultados del Tratamiento Terciario por Electrodialisis Reversible (EDR).

Parámetros de Operación.

En el proceso de EDR, la polaridad de los electrodos se invierte cada 15 – 30 minutos evitando de esta manera las incrustaciones de sales en los electrodos lo que permite operar con índices de corrosividad positivos. La planta contiene 320 pares de células y cada par de células está formado por:

- Una membrana de transferencia aniónica.
- Un espaciador para el agua desmineralizada.
- Una membrana de transferencia catiónica.
- Un espaciador de salmuera.

Los parámetros de operación son:

Caudal del agua de alimentación	5,0 m ³ /h
Caudal del agua producto	4,2 m ³ /h
Número de pares de células	320
Intensidad máxima de corriente	4 A

Previamente a la entrada del agua en la unidad de EDR se le sometió a un tratamiento físico – químico (cal + cloruro férrico) y utilizando cloro como desinfectante, los resultados obtenidos se indican en la tabla siguiente:

Parámetros	Agua de Alimentación (Valor medio)	Agua Producto (Valor medio)	Eliminación

pH	5,9	5,8	-----
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3280	647	80%
STD (mg/l)	2070	390	81%
NO_3^- (mg/l)	12,7	3,9	69%
PO_4^{-3} (mg/l)	10	7	30%
SiO_2 (mg/l)	50	49	-----
DBO_5 (mg/l)	11	6	45%
DQO (mg/l)	79	59	25%

Del análisis de las tablas se deduce que el contenido de amonio, nitratos y fosfatos en las aguas producto de la EDR es superior al encontrado en las aguas producto de la OI. La aplicación de uno u otro sistema dependerá del cultivo a regar con las aguas producto de uno u otro proceso.

- **BIBLIOGRAFÍA**

1. CATALAN LAFUENTE,J. **Química del Agua**. Librería Editorial Bellisco 1990.
2. BROWN, T.L. LEMAY, H.E. y BURSTEN, B.E. **Química. La Ciencia Central**. Prentice – Hall. 1993.
3. CHANG,R. **Química**. McGraw – Hill. 1994.
4. DEGRÉMONT. **Manual Técnico del Agua**. 1989.
5. DICKSON, T.R. **Química. Enfoque Ecológico**. Limusa. 1992.
6. GRAY, N.F. **Calidad del Agua Potable. Problemas y Soluciones**. Acribia. 1996.
7. MARÍN GALVÍN,R. **Química, Microbiología, Tratamiento y Control analítico de Aguas. Una Introducción al Tema**. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 1996.
8. SEOANEZ CALVO, M. **Aguas Residuales Urbanas. Tratamientos Naturales de Bajo Costo y Aprovechamiento**. Colección Ingeniería Medioambiental. Mundi – Prensa. 1995.
9. VIAN ORTUÑO, A. **Introducción a la Química Industrial**. Reverté. 1994.
10. **Aguas Nuevas**. Vol. I. Proyecto D.E.R.E.A. 1996.
11. **Desalación 96**. Nº 57. Tecnoambiente 1996.
12. **El Agua en el Medio Ambiente. Problemática, Contaminación y Potabilización**. Vol. 33. Nº 6. Química e Industria. 1987.
13. **La Contaminación de la Hidrosfera**. Vol. 34. Nº 6. Química e Industria. 1988.
14. **Semana Tecnológica del Medio Ambiente**. Nº 59. Tecnoambiente.1996.