

## **INTRODUCCIÓN**

### **1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MICROORGANISMOS PRESENTES EN EL AGUA**

**1.1. Características de las bacterias**

**1.2. Características de los virus**

**1.3. Otros microorganismos**

## INTRODUCCIÓN.

El estudio de los procesos relacionados con la presencia de microorganismos en el subsuelo esta siendo objeto de un interés creciente por parte de la comunidad científica, contemplándose dos vertientes, por un lado la presencia de microorganismos como constituyentes no deseables del agua (caso de microorganismos patógenos) y por otro su importancia en la química del agua y depuración de los compuestos contaminantes

La presencia de microorganismos en el agua subterránea no es necesariamente consecuencia de una contaminación, de hecho existen microorganismos en todos los hábitats de la biosfera, sin embargo las características especiales de este medio, sometido a condiciones ambientales muy diferentes a las que se encuentran en las aguas superficiales, y además carente de luz y aportes de materia orgánica -salvo en casos excepcionales- hacen que la población microbiana de las aguas subterráneas sea escasa y con unas características especiales.

Esta publicación pretende servir de introducción a los técnicos del agua subterránea en el campo de la microbiología y a los microbiólogos en el de las aguas subterráneas y, sin entrar en un tratamiento excesivamente técnico o científico, proporcionar las bases necesarias para poder consultar y entender la bibliografía especializada

Juan Antonio López Geta.

Director de Aguas Subterráneas y Geotécnia.

---

## 1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MICROORGANISMOS PRESENTES EN EL AGUA

---

El agua es sin duda imprescindible para la supervivencia de todos los seres existentes sobre nuestro planeta, en ella tuvo origen la vida y sin su presencia ninguna reacción biológica tendría lugar. Por tanto, desde el comienzo, la evolución ha ido creando multitud de formas adaptadas a vivir en este elemento y en las más diversas condiciones, desde las frías aguas glaciares cercanas a su punto de congelación a las aguas hirvientes de manantiales termales, de aguas puras de alta montaña a lagos salados, aguas superficiales y aguas subterráneas, todas contienen o pueden contener alguna forma de vida

Los microorganismos que pueblan las aguas constituyen un grupo extraordinariamente heterogéneo. Se agrupan bajo la denominación de protistas debido a su sencilla organización. Se pueden diferenciar los protistas inferiores y superiores:

Protistas inferiores. Archeobacterias, Bacterias, Cianobacterias

Protistas superiores. Protozoos, Hongos, Algas

Los protistas inferiores son procariotas, es decir no poseen estructuras celulares aisladas por membranas como las mitocondrias y tampoco poseen un núcleo diferenciado.

Los protistas superiores son eucariotas, poseen mitocondrias, un núcleo diferenciado y una gran variedad de orgánulos celulares aislados o formados por membranas. Las células de animales y plantas también son eucariotas.

Los virus son acelulares, por lo que no pueden ser clasificados según estos criterios y se verán más adelante como un sistema organizado totalmente diferente.

A continuación se hace una breve descripción de los microorganismos que habitan las aguas y en especial los que pueden encontrarse en el agua subterránea.

---

### 1.1.- CARACTERÍSTICAS DE LAS BACTERIAS.

---

Las bacterias son los microorganismos más pequeños que contienen la maquinaria necesaria para crecer y multiplicarse. Se trata de organismos primitivos, de estructura sencilla que han sido capaces de poblar todos los hábitats terrestres. Son por ello un grupo muy heterogéneo con muy diferentes necesidades nutricionales y energéticas

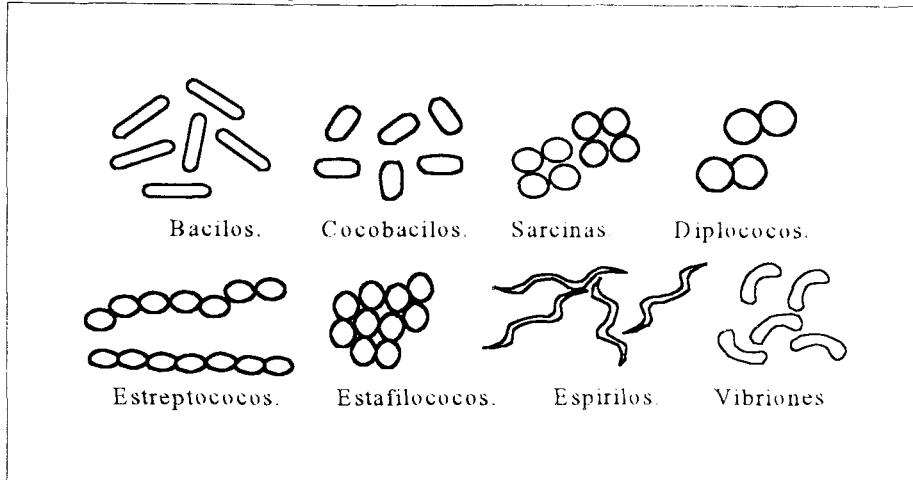
Hasta el desarrollo del microscopio electrónico no se pudo observar la estructura interna de las bacterias, consideradas hasta entonces como simples contenedores de enzimas sin estructura alguna, poseen una membrana celular que regula el intercambio de nutrientes y desechos con el exterior, y lo que es característico de este grupo, una pared celular rodeando a la membrana, útil en medios de baja presión osmótica evitando

que estalle la célula. Sin embargo carecen de núcleo y de otros órganos rodeados por membrana (como las mitocondrias).

Presentan estructuras especiales como pelos, flagelos, fimbrias, etc, que facilitan su movimiento y adherencia. Bacterias

carentes de estas estructuras son capaces de moverse mediante un mecanismo parecido a la reptación

Figura 1.1.- Formas típicas de bacterias



Algunas bacterias están rodeadas por una sustancia viscosa denominada "cápsula", puede ser un

Las dimensiones más frecuentes de estos organismos oscilan entre 0,5 - 1 por 2 - 5  $\mu\text{m}$ . Para hacerse una idea de lo que este tamaño representa, se puede poner el ejemplo de que en un centímetro cúbico caben aproximadamente un millón de billones de bacterias de tamaño medio. Consecuencia de este pequeño tamaño es la elevada relación superficie - volumen de estos seres, lo que explica el rápido intercambio de sustancias con el exterior y por ello su gran velocidad de desarrollo.

depósito de sustancias nutritivas de reserva e incluso productos de desecho. La presencia de cápsula es determinante, en algunas bacterias infecciosas, al impedir la acción de los fagocitos. El desarrollo de bacterias con cápsula mucosa ha producido graves problemas de colmatación de filtros en sondeos

La forma de las bacterias es variada, (figura 1.1) pueden ser esféricas (cocos), alargadas como un bastón (bacilos), con forma de estrella, de espiral (espirilos), comas, anulares, etc. También se encuentran agrupadas, normalmente en cadenas más o menos ramificadas (estreptococos, estafilococos, diplococos)

Algunos generos (*Bacillus* y *Clostridium*) presentan la capacidad de producir esporas extraordinariamente resistentes a las condiciones ambientales y agentes desinfectantes.

Sus necesidades nutricionales y energéticas son muy variables. Existen grupos fotoautótrofos (obtienen la energía de la luz solar, como las clorobacterias y bacterias púrpura), quimioautótrofos (la obtienen de reacciones químicas, como azobacterias, sulfobacterias, siderobacterias), aunque en

su mayor parte son heterótrofas (obtienen la energía de la materia orgánica)

Los elementos necesarios para el desarrollo de los microorganismos se agrupan en dos categorías: elementos mayoritarios (C, O, N, P, S, K, Na, Ca, Fe) y elementos minoritarios o traza, necesarios solo en cantidades muy pequeñas (Mn, Mg, Cu, Sn, Mo). El carbono, necesario para la fabricación de metabolitos intermedios y en general para los esqueletos carbonatados se obtiene del CO<sub>2</sub> o de los compuestos orgánicos. El azufre, necesario para la síntesis de aminoácidos y proteínas, se obtiene de compuestos orgánicos azufrados o de sulfatos y sulfuros. El fósforo, empleado principalmente en la síntesis de fosfolípidos se obtiene de compuestos inorgánicos (fosfatos)

Dentro del grupo de las bacterias heterótrofas se encuentran los agentes causantes de enfermedad en el hombre, animales y plantas, constituyendo además la mayor parte de la población microbiana que nos rodea. En el agua se encuentran principalmente bacterias Gramnegativas, caracterizándose por ser capaces de vivir en medios oligotróficos (con baja concentración de nutrientes).

---

## 1.2.- CARACTERÍSTICAS DE LOS VIRUS.

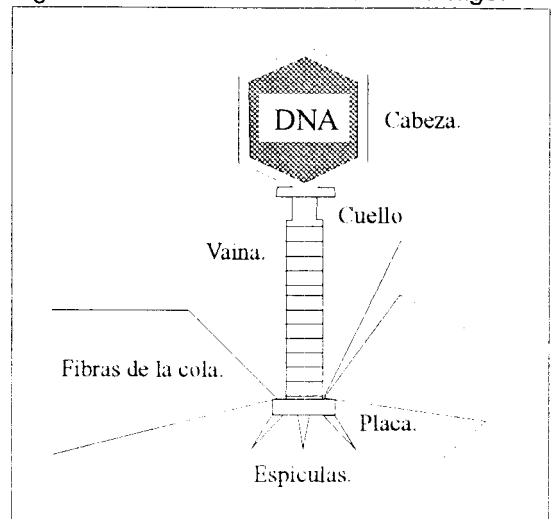
---

Los virus han sido considerados por muchos autores como la expresión más simple de la vida, e incluso existen discrepancias sobre si se les puede adjudicar tal condición

Presentan una estructura consistente en una molécula de ácido nucleico (ya sea ADN o ARN, pero solo uno de ellos) rodeado de proteínas combinadas en algunas ocasiones con lípidos o carbohidratos (cápsida).

Su estudio fue muy problemático pues su pequeño tamaño impedía tanto la observación mediante microscopía óptica como la retención por filtros comunes para

Figura 1.2.- Estructura de un bacteriofago.



bacterias, por lo que se denominaron "agentes filtrables". Un virus solo puede reproducirse dentro de células vivas, lo que impidió durante largo tiempo el estudio de los virus patógenos para el ser humano.

Existen virus parásitos del hombre, animales y plantas, pero también de hongos y bacterias. Precisamente estos últimos, los bacteriófagos, son los más estudiados. En algunos bacteriófagos se puede diferenciar hasta una cabeza, una cola y a veces unas estructuras llamadas espículas (figura 1.2).

Las partículas víricas extracelulares no presentan actividad metabólica ni movilidad, no se multiplican ni crecen ni presentan intercambio energético alguno. En este estado muchos virus son cristalizables de forma semejante a como lo hacen moléculas químicas sencillas. Son por tanto parásitos intracelulares estrictos y solo se muestran activos cuando invaden su célula hospedadora específica.

En la fase intracelular, la presencia del virus hace que los mecanismos reproductores de la célula hospedadora procedan al ensamblaje de la siguiente generación de virus en lugar de reproducirse a sí misma, provocando el colapso metabólico y su muerte. Existen virus que se incorporan al material genético de la célula hospedadora sin destruirla, de modo que al reproducirse

la célula reproduce también el virus interno. Un estímulo externo provoca el paso del estado lisogénico al virulento, ensamblándose una nueva generación de virus y destruyendo la célula. Es importante destacar que estos virus permiten la modificación del material genético del hospedador, al que son capaces de incorporar fragmentos nuevos o hacer desaparecer otros

---

### 1.3.- OTROS MICROORGANISMOS.

---

Las bacterias y virus son los organismos que con más probabilidad pueden ser encontrados en las aguas subterráneas, sin

Tabla 1.1- Resumen de los tipos y características de los microorganismos que pueden estar presentes en el agua.

TIPO	CÉLULA	TAMAÑO	FORMA	NUTRICIÓN	CONDICIONES DE DESARROLLO		
					T°	OXIGENO	pH
<b>BACTERIAS</b>	Procariótica	1-2 x 1-4 $\mu\text{m}$	Esférica Helicoidal Cilíndrica	Autótrofa Heterótrofa	0-60°C	Aerobias Anaerobias estrictas facultativas	4-9 Óptimo 6.5-7.5
<b>HONGOS</b>	Eucariótica	Variable 10-100 $\mu\text{m}$	Filamentosa	Heterótrofa	0-62°C	Anaerobios facultativos Aerobios	2-9 Óptimo 5-6
<b>ALGAS</b>	Eucariótica	Variable	Esférica Bacilar Alargada	Autótrofa	0-90°C	Aerobias	
<b>CIANO- BACTERIAS</b>	Procariótica	Variable 0.5-100 $\mu\text{m}$	Esférica filamentosa	Autótrofa	0-70°C	Aerobias Anaerobias	
<b>PROTOZOOS</b>	Eucariótica	5 $\mu\text{m}$	Variable	Autótrofa Heterótrofa	16- 25°C	Aerobios Anaerobios	3-9 Óptimo 6-8
<b>VIRUS</b>	Molécula orgánica de ácido nucleico	15 - 150 nm	Poliédrica Helicoidal	Se reproducen por replicación. Parásitos estrictos, necesitan células vivas			

embargo también pueden encontrarse otras formas de vida, la mayor parte de ellas provenientes de capas superiores o incluso de aguas superficiales, aunque su mayor tamaño hace que sean más fácilmente filtrables por el terreno.

#### *ALGAS:*

Son seres autótrofos, con pigmentos (clorofila) que les permiten emplear la luz como fuente energética. En el agua subterránea se encuentran solo de forma accidental, ya que en el subsuelo hay una carencia absoluta de luz. Pueden ser introducidas por infiltración de aguas superficiales o a través de los pozos excavados de gran diámetro, en los que en ocasiones la luz solar llega hasta el agua provocando la proliferación de algas.

Existe una gran variedad de algas. Algunas tienen incluso movimientos de reptación o flagelos, que les permiten desplazarse; otras pueden emplear materia orgánica para su nutrición (cianofíceas), fijar el nitrógeno del aire o atacar la roca caliza.

#### *HONGOS:*

Son organismos eucarióticos heterótrofos. No poseen plastidios y son en general incoloros. Se reproducen mediante esporas. Acumulan glucógeno y grasa como reserva, pero nunca almidón. Necesitan condiciones aerobias, obteniendo la energía de la oxidación de la materia orgánica. Viven saprofiticamente o como parásitos y algunos son heterótrofos no solo respecto al carbono y nitrógeno sino también respecto a sustancias activas.

Fisiológicamente se adaptan a condiciones más severas que otros microorganismos.

toleran y se desarrollan en condiciones de acidez más elevadas (pH 2 a 9 con un óptimo a 5-6); soportan condiciones de sequedad que serían letales para bacterias no esporuladas. Las temperaturas óptimas están entre 22 y 30 °C aunque hay formas que resisten los 0 °C.

En aguas subterráneas sin contaminar el bajo contenido en nutrientes impide el desarrollo de los hongos. Sin embargo pueden proliferar en el caso de contaminación con materia orgánica.

#### *PROTOZOOS:*

Son protistas eucarióticos heterótrofos que se encuentran como células aisladas o en colonias. Hay protozoos que viven libremente y otros que lo hacen como parásitos o como simbioses.

La temperatura óptima para la mayoría de los protozoos está entre 16 y 25 °C y la máxima entre 36 y 40 °C. Algunos pueden tolerar un rango amplio de pH, entre 3,2 y 8,7; sin embargo la mayor parte desarrolla su máxima actividad metabólica con pH entre 6 y 8.

Algunos protozoos prosperan en aguas ricas en oxígeno pero pobres en materia orgánica (manantiales, arroyos o lagunas), mientras que otros requieren aguas ricas en minerales. Algunos crecen en aguas donde hay oxidación activa y degradación de la materia orgánica; en cambio, otros prefieren aguas con muy poco oxígeno pero ricas en productos en descomposición (por ejemplo aguas negras).

La abundancia de nutrientes en un hábitat es el factor determinante principal del número de protozoos que viven en éste.

Existen especies que se alimentan de otros microorganismos y necesitan un suministro de bacterias u otros organismos semejantes

Además de estos organismos unicelulares, en ocasiones excepcionales (acuíferos kársticos con cavernas de suficiente tamaño) pueden encontrarse en el agua

subterránea formas superiores de vida que emplean el agua en una parte o la totalidad de su ciclo biológico. A título de ejemplo se pueden citar muchos parásitos, como los platelmintos (que son nadadores libres), cercarias de ciertos trematodos diagenéticos, larvas ciliadas de monogenéticos y platelmintos, etc.



## **2. CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA**

**2.1. Acuíferos, aguas subterráneas**

**2.2. Clasificación de los acuíferos**

**2.3. Funcionamiento de los acuíferos**

**2.4. Parámetros característicos de los acuíferos**

**2.5. Otros conceptos y definiciones**

---

## 2.- CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA

---

---

### 2.1.- ACUÍFEROS, AGUAS SUBTERRÁNEAS

---

Los conceptos de acuífero y de agua subterráneas pueden variar según se trate de sistemas en estado natural o de sistemas en explotación, de forma que se suele aceptar una definición más amplia en el caso de unidades no explotadas que cuando se ponen por medio intereses económicos, sin embargo la lógica parece indicar que dicha definición ha de ser independiente del uso del recurso.

#### **Definición.**

En la legislación actual<sup>1</sup> se define como acuífero "las formaciones geológicas por las que circulan aguas subterráneas"; aunque es una definición correcta parece algo simplista al no considerar ninguna de las propiedades o características que definen estas estructuras, pues existen formaciones por las que circula agua, pero lo hace en cantidades tan pequeñas o a velocidades tan reducidas que apenas pueden ser aprovechada.

---

<sup>1</sup> Ley 29/1985 de 2 de agosto de aguas. Capítulo IV, artículo 12. BOE 189-1985

Entre las definiciones recogidas en la bibliografía puede destacarse la siguiente<sup>2</sup>: "*Formación, grupo de formaciones o parte de una formación que está saturada y es lo suficientemente permeable para transmitir cantidades de agua económicamente rentables a manantiales o de ser captadas mediante algún sistema de explotación como galerías, zanjas, pozos, sondeos, etc.*" Esta definición contiene algunos detalles que es conveniente aclarar:

\* Existen materiales, como las arcillas, que pueden contener importantes cantidades de agua pero que al encontrarse fuertemente retenidas por fuerzas capilares<sup>3</sup> no es posible su extracción por lo métodos citados anteriormente, por lo que estas formaciones no pueden ser consideradas como acuíferos (de hecho las estructuras arcillosas constituyen acuitardos<sup>4</sup> que las aguas subterráneas atraviesan de forma extraordinariamente lenta ).

\* Considerar como acuífero únicamente formaciones "económicamente aprovechables" presenta la dificultad de decidir cuando la explotación de una unidad presenta esta característica. En la

---

<sup>2</sup> Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas. ITGE 1991

<sup>3</sup> La cantidad de agua contenida en un material no es un indicador de la facilidad con la que puede ser extraída. El volumen máximo de agua contenido en un material está en función de la porosidad eficaz que en el caso de las arcillas puede alcanzar valores tan elevados como el 70%, mientras que la facilidad o dificultad para su extracción está ligada al tamaño de estos poros.

<sup>4</sup> Un acuitardo es una formación muy poco permeable por la que puede circular el agua aunque a velocidades muy lentas.

cartografía hidrogeológica de nuestro país, se clasifican como zonas carentes de acuífero áreas en las que la explotación del agua supone sin embargo un capítulo importante en la economía local, aunque puedan ser poco relevantes a nivel regional.

\* El agua que brota de los manantiales, aunque ya no está contenida en una estructura geológica, es agua subterránea y posee todas las características de éstas, no pudiendo diferenciarse, desde un punto de vista físico o químico, el agua que mana de la que se encontraba unos instantes antes en el acuífero, además el uso de manantiales es una forma de regular la explotación de aguas subterráneas.

Agua subterránea será pues, en un sentido muy amplio, la que se encuentra contenida en el interior de los acuíferos y la que brota de los manantiales hasta que su interacción con el medio y en especial con los materiales que la rodean y la atmósfera modifican sus características físicas, químicas o físico-químicas (pH, Eh, temperatura, composición química, gases disueltos, desarrollo de actividad biológica, etc.)

---

## 2.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.

---

Son muchas las clasificaciones que se han hecho de los acuíferos en función de criterios diversos hidrogeológicos, económicos, geológicos, etc. pero lo que más nos interesa es el empleo de la vulnerabilidad a la contaminación microbiológica, como criterio de

diferenciación, en base a esto podemos hablar de.

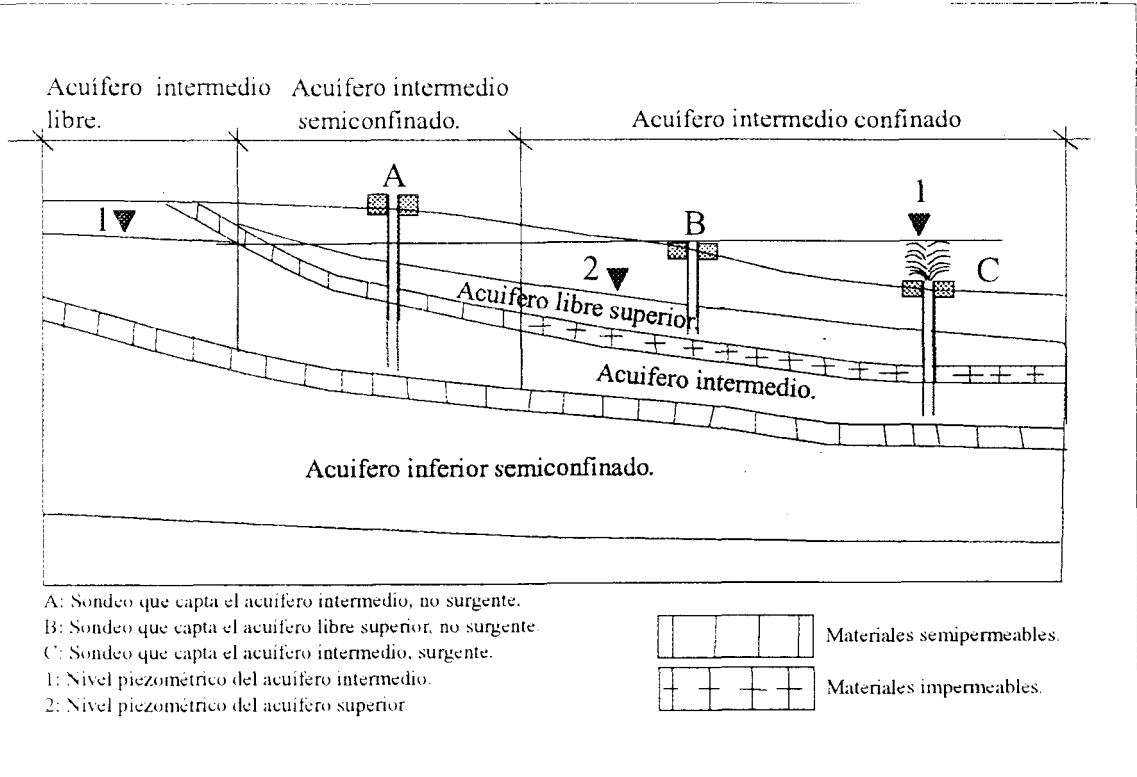
\* **Acuíferos libres:** Se trata del modelo más simple, consisten en una estructura geológica permeable, saturada de agua hasta cierto nivel, por encima del cual existe una franja de terreno permeable no saturada, a través de la cual circula el agua de recarga. Si abrimos una captación (pozo, sondeo, etc.) el agua asciende hasta el nivel que tiene en el acuífero, encontrándose la presión atmosférica. El agua extraída del sistema proviene del vaciado de los poros.

El nivel que alcanza el agua en un pozo construido en un acuífero libre marca el nivel freático, que en este caso corresponde con el nivel piezométrico.

\* **Acuíferos confinados,** a presión o en carga: la roca permeable que forma el acuífero se encuentra encajada o aislada por encima (techo) y por debajo (muro) de terrenos impermeables. Todo el espesor del acuífero se encuentra saturado de agua, y la presión de ésta en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica, de forma que cuando es perforado por un sondeo, asciende a su través quedando a un nivel por encima del punto en que la captación alcanza el acuífero. Cuando el nivel piezométrico se encuentra sobre la superficie del terreno el agua rebosa por la boca de la captación, formando lo que se conoce como un pozo artesiano o surgente.

\* **Acuíferos semiconfinados:** la roca encajante no es totalmente impermeable, permitiendo el paso de cierta cantidad de agua a su través, la formación semipermeable se denomina acuitardo. La baja permeabilidad del acuitardo no permite

Figura 2.1.- Modelos de acuífero libre, semiconfinado y confinado.



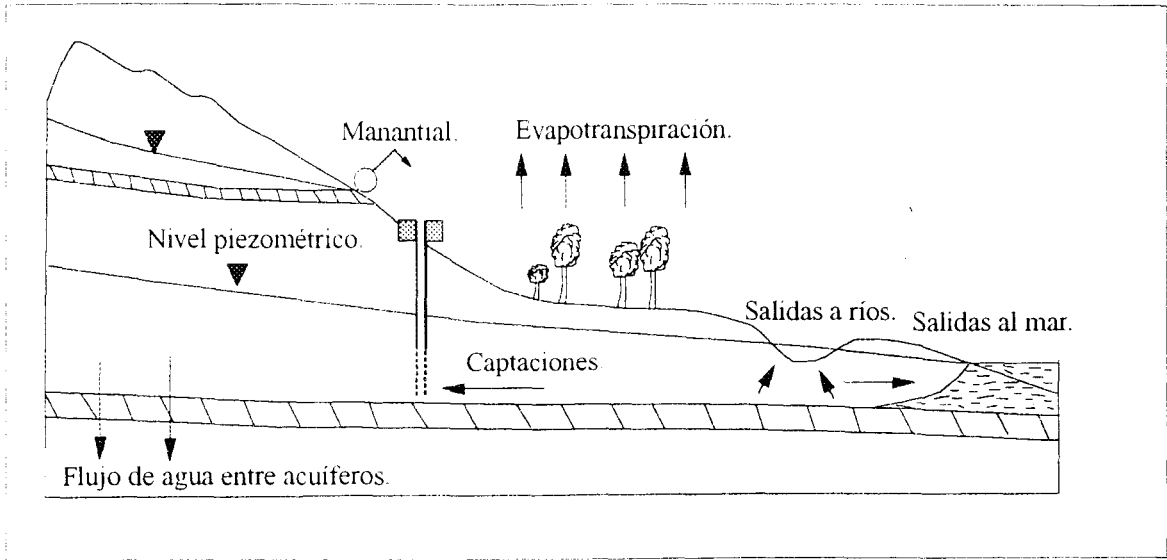
su aprovechamiento mediante captaciones, sin embargo, la cantidad de agua que atravesándolo llega al acuífero puede suponer un porcentaje importante de la recarga total de este. Las características de este tipo de acuífero, pueden considerarse en cierta medida intermedia entre las de uno libre y otro confinado.

Estos modelos tan simplistas no suelen encontrarse en la naturaleza, normalmente se producen estructuras mucho más complejas, de tipo multicapa, en las que se superponen varios acuíferos semiconfinados o en carga, en cuya parte superior puede existir uno libre

Estos modelos pueden a su vez diferenciarse en:

\* **Acuíferos porosos**, cuando están constituidos por materiales sueltos: arenas, gravas, etc., encontrándose el agua en el espacio intragranular que queda entre partículas. Las características del acuífero están determinadas principalmente por la textura (granulometría) de los materiales y el tipo y cantidad de arcillas que contienen, en especial la presencia de arcillas expansibles como las montmorillonitas pueden modificar notablemente las características de transmisividad hidráulica de la porción superior de la zona no saturada y del suelo al formarse grietas de desecación en épocas de fuerte estiaje.

Figura 2.2.- Salida de agua de los acuíferos.



\* **Acuíferos karstificados y/o fisurados:** su material constitutivo -la mayoría de las ocasiones con una permeabilidad primaria muy reducida- presenta numerosas grietas, fracturas y oquedades, ya sea debido a procesos de disolución (calizas y dolomías, yesos, etc.) o a la aparición de fracturas de muy diverso origen en materiales insolubles

(granitos, basaltos, etc.) a través de las cuales circula el agua. Estos acuíferos se forman sobre gran variedad de materiales, siendo los de mayor importancia -por el volumen de aguas que se aprovechan- los formados en karst sobre calizas, también pueden encontrarse sobre otros materiales solubles como los yesos, pero la composición de sus aguas (sulfatadas, y en

Figura 2.3.- Entrada de agua a los acuíferos

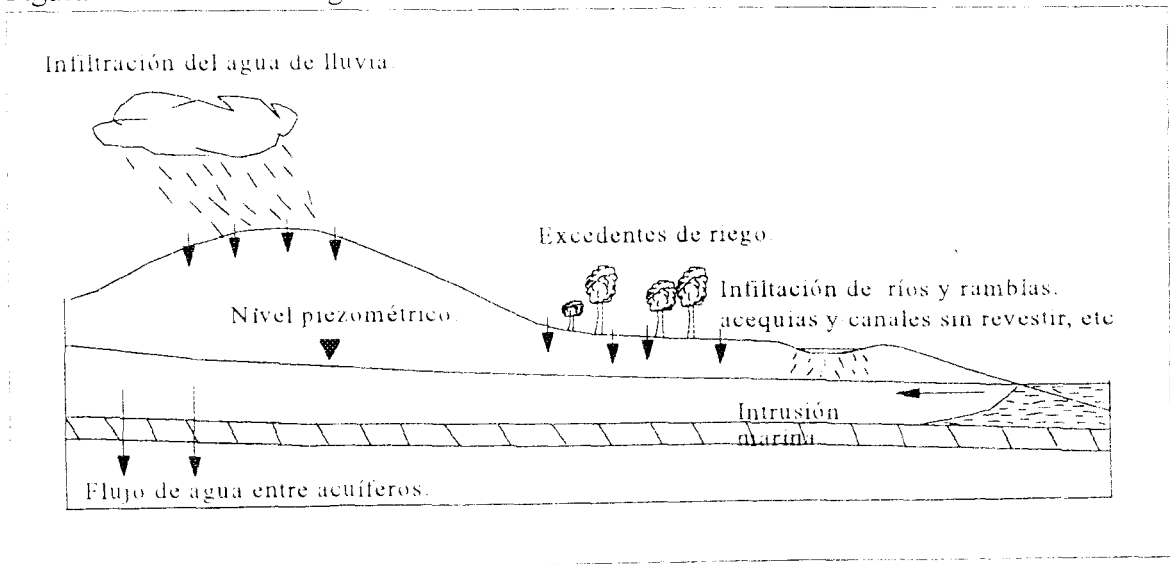


Tabla 2.1 - Valores típicos de permeabilidad (K)

K (m/día)	Calificación estimativa	Posibilidades de acuífero.
$K < 10^{-2}$	Muy baja.	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
$10^{-2} < K < 1$	Baja.	Entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
$1 < K < 10$	Media.	Entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
$10 < K < 100$	Alta.	Entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
$K > 100$	Muy alta.	Más de 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

IGME (1984)

la mayoría de las ocasiones de elevada mineralización) hace que sean menos aprovechadas. Los materiales menos permeables, como los granitos o los basaltos pueden contener agua cuando se encuentran alterados o presentan fracturas

De forma natural los acuíferos disponen de unas zonas a través de las cuales penetra el agua, son las zonas de recarga y una vez que se llega al límite de su capacidad de almacenar agua de unos "rebosaderos" naturales, son las zonas de descarga.

---

### 2.3.- FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS.

---

Para comprender y explicar como pueden influir las características del suelo sobre la composición del agua de un acuífero es necesario conocer en detalle su funcionamiento, en este apartado se explica de forma general la teoría de funcionamiento de los acuíferos.

Un acuífero puede considerarse similar a un embalse superficial, en ambos casos puede hablarse de una capacidad de almacenamiento, de unas entradas y salidas, de una capacidad de regulación, un plan de explotación, etc

El agua de recarga puede proceder de la lluvia o nieve que se infiltran a través de superficies permeables, de la infiltración de ríos o ramblas, de la aportación subterránea de otros acuíferos con los que tiene contacto hidráulico, etc. Debido a la acción del hombre han surgido nuevas fuentes de recarga, que en muchos casos representan un volumen muy significativo del total de agua infiltrada, estas fuentes son:

- Retornos de riego.
- Infiltración de canales y acequias no revestidos o en mal estado.
- Fugas de embalses, infiltración de vertidos urbanos o de otro tipo.
- Formas controladas de infiltración, principalmente las balsas de infiltración, y los sondeos de inyección.

Tabla 2.2.- Valores típicos de porosidad.

Materiales	m%
Depósitos no consolidados	
Gravas	25-40
Arenas	25-40
Limos	35-70
Arcillas	40-70
Rocas	
Basalto fracturado.	5-50
Calizas kársticas	5-50
Areniscas.	5-30
Calizas, dolomías.	0-20
Pizarras.	0-20
Rocas cristalinas fracturadas.	0-10
Rocas cristalinas compactas.	0-5

IGME (1984)

El agua sale del acuífero, y lo hace, en el caso de encontrarse en funcionamiento en régimen natural, (antes de realizar captaciones de aguas subterráneas), por manantiales, descargas a cauces de ríos, hacia otros acuíferos vecinos, y en el caso de tratarse de un acuífero costero, al mar

En condiciones de régimen natural, un acuífero está mal aprovechado, porque no se utilizan las descargas de los manantiales al no adaptarse éstas al programa de demandas y no se pueden controlar eficazmente las descargas subterráneas.

## 2.4.- PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN ACUÍFERO.

La propiedad de la roca que la hace almacenar agua es la porosidad que se define como: "*fracción de espacios vacíos que contiene un material sólido respecto al volumen total*". Es preciso diferenciar la *porosidad total* que acaba de ser definida de la *porosidad eficaz* que se refiere únicamente a los poros interconectados y que por tanto contribuyen al flujo de agua subterránea. La medida de la porosidad de los materiales, sobre todo en el caso de acuíferos libres, puede proporcionar una buena estimación del agua que puede contener.

La roca, además de contener agua debe ser capaz de cederla en cantidades aprovechables, a dicha cualidad se la denomina *permeabilidad* (K). Por ejemplo, hay arcillas que pueden absorber notables cantidades de agua en su espacio poroso (la mayoría de las veces superior al 50% en volumen), pero bajo condiciones naturales no la ceden, sino que la retienen en su masa al encontrarse retenida por intensas fuerzas capilares.

La permeabilidad se define como el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero bajo la influencia de un gradiente unitario a la temperatura de campo.

$$K = \frac{cd^2\gamma}{\mu}$$

donde

- K** = permeabilidad
- c** = constante adimensional
- d<sup>2</sup>** = factor que depende de la superficie intergranular
- γ** = peso específico del fluido
- μ** = viscosidad del fluido a la temperatura de campo.

*caudal de agua que proporciona una sección de ancho unidad de frente acuífero sometida a un gradiente del 100%”.*

Las unidades de transmisividad son:  $T = (L^3 / T) / L = L^2 T^{-1}$  expresándose normalmente en m<sup>2</sup>/día.

La permeabilidad es un índice de la facilidad con la que el agua atraviesa los

Tabla 2.3.- Clasificación de los terrenos por su transmisividad (m<sup>2</sup>/día).

<b>T</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>100</b>	<b>1000</b>	
<b>Clasificación</b>	<b>Impermeables</b>	<b>Poco Permeable</b>	<b>Algo Permeable</b>	<b>Permeable</b>	<b>Muy Permeable</b>
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno.	Acuífero excelente.
Tipo de materiales	Arcilla compacta. pizarra. granito.	Limo arenoso. limo. arcilla limosa	Arena fina. arena limosa. caliza poco fracturada. basaltos.	Arena limpia. grava y arena. arena fina. caliza fracturada.	Grava limpia. dolomías. calizas muy fracturadas

Custodio, E. (1983)

El término  $cd^2=k$  se conoce como *permeabilidad específica o intrínseca*, y depende únicamente de las características del terreno. La permeabilidad,  $K = LT^{-1}$ , se expresa normalmente en m/día

En general, permeabilidad y porosidad son parámetros que definen las características hidráulicas del acuífero. En la práctica se utiliza el parámetro *transmisividad* (T), que es el producto de la permeabilidad del acuífero por su espesor saturado. La transmisividad se define también como “el

materiales del acuífero, pero no dice nada sobre la cantidad que puede ceder.

Otro parámetro importante es el *coeficiente de almacenamiento* (S), representa la cantidad de agua cedida por un prisma de acuífero de un metro cuadrado de sección y altura la de éste cuando el nivel piezométrico desciende un metro.

El coeficiente de almacenamiento no siempre depende de forma exclusiva, como en principio pudiera parecer, de la



Tabla 2.4.- Valores típicos de coeficientes de almacenamiento.

Tipo de material permeable.	Forma de funcionamiento del acuífero.	Valores medios de S.
Kárstico Calizas y dolomías Jurasicas Calizas y dolomías Cretácicas y terciarias.	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$2 \cdot 10^{-5}$
Calizas y dolomías Cretácicas y terciarias.	Libre	$2 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Poroso intergranular: Gravas y arenas.	Libre	$5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
Kársticos y porosos: Calcarenitas marinas terciarias.	Libre	$15 \cdot 10^{-2} - 18 \cdot 10^{-2}$

IGME 1984

porosidad eficaz del acuífero pues el agua que una formación puede ceder proviene, además de vaciado de los poros, de un proceso de distensión elástica de la estructura (especialmente en acuíferos en carga o a presión). El efecto más inmediato de esta propiedad es que acuíferos en apariencia similar (con la misma cantidad de espacio poroso) pueden proporcionar cantidades de agua diferentes

Los conceptos hasta ahora definidos son suficientes para explicar lo que se entiende por capacidad de almacenamiento o reservas, que en definitiva será la cantidad de agua utilizable mediante bombeos. las reservas como el producto de la superficie del acuífero por su espesor saturado de agua y por su coeficiente de almacenamiento

## 2.5.- OTROS CONCEPTOS Y DEFINICIONES.

### Nivel piezométrico, nivel freático.

La superficie freática se define como: "el lugar geométrico de los puntos de agua donde la presión hidrostática se iguala a la presión atmosférica", es el nivel que alcanza el agua en un acuífero libre. El agua puede ascender aún más por efecto de las fuerzas capilares, encontrándose en este caso sometida a una presión negativa.

El nivel piezométrico en un punto del acuífero es el nivel que alcanzaría el agua si se pone en contacto con la atmósfera. Nivel piezométrico y nivel freático coinciden en el caso de acuíferos libres.

En la figura 2.4 puede verse un esquema que muestra las relaciones entre nivel piezométrico y freático

### **Suelo, zona no saturada**

Con frecuencia, en los trabajos de contaminación de las aguas subterráneas se habla de forma indistinta refiriéndose al suelo y a la zona no saturada, prefiriéndose la palabra suelo como término genérico con lo que frecuentemente se hace referencia a suelos que tendrían según este criterio decenas o incluso centenares de metros de espesor (¿?). En este tipo de trabajo debiera considerarse el suelo tal y como es considerado en la edafología, pues se trata de una unidad claramente diferenciada del resto de la zona no saturada y con la entidad e importancia suficientes para hacerlo así, el suelo es además la parte más activa desde el punto de vista de depuración de las aguas al contener la mayoría de la materia orgánica de la zona no saturada y mantener la actividad biológica

Así pues se define el suelo como "La materia mineral no consolidada de la superficie de la tierra que esta sujeta a la influencia de los factores genéticos y medioambientales (material original, clima incluyendo temperatura y régimen de humedad, macro y micro organismos, topografía), los cuales interactuando durante prolongados periodos de tiempo proporcionan unas propiedades biológicas, físicas, químicas y morfológicas características

La zona no saturada es la porción superior del acuífero cuyos poros no se encuentran saturados de agua, incluyendo el suelo y la franja de agua capilar

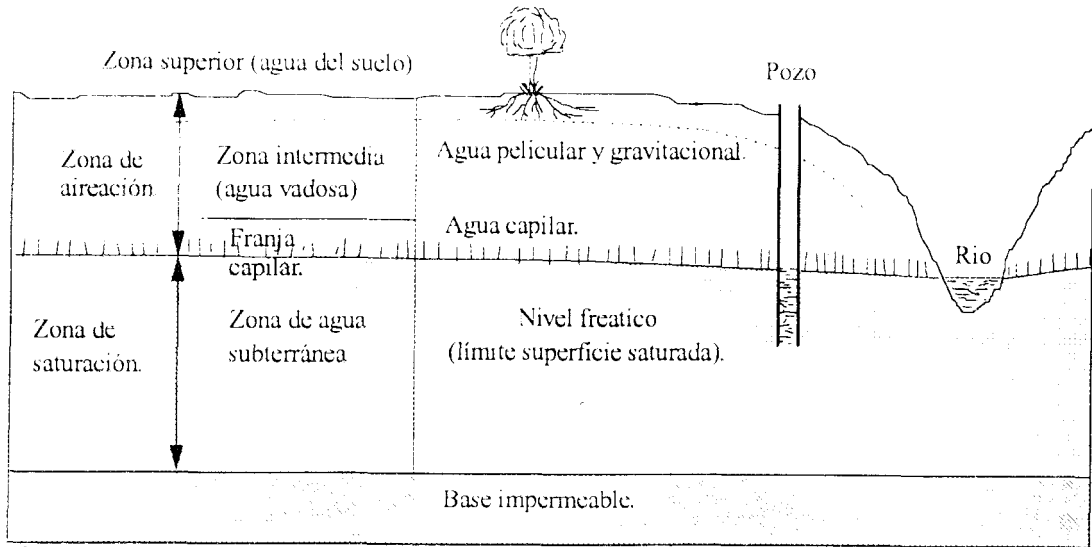
En la figura 2.4 se muestra de forma esquemática la distribución del agua en el subsuelo. En principio, cabe diferenciar dos zonas principales, la zona de agua subterránea o de saturación, en la cual todos los poros se encuentran llenos de agua, su límite superior lo constituye el nivel freático, la interfase entre la zona de saturación y de aireación -que es la otra zona principal- no es abrupta, está formada por una franja de agua capilar de mayor o menor espesor según las características de los materiales acuíferos. En la zona de aireación, también llamada intermedia o vadosa, los poros pueden estar llenos de aire, con agua en tránsito hacia la zona saturada por efecto de la gravedad (agua gravitacional) o con agua retenida por fuerzas capilares o peliculares (agua capilar o pelicular). Por último, en la porción superior, se encuentra el agua del suelo, en todo similar a la de la zona no saturada

### **Calidad, contaminación del agua.**

Como se vio en el capítulo anterior, pueden encontrarse aguas de pésima calidad ( muy sulfatadas, cloruradas, o duras, etc ) sin que por ello se encuentren contaminadas, incluso el hecho de introducir sustancias extrañas puede llegar a mejorar la calidad del agua para un uso determinado (es el caso del exceso de nitratos en la agricultura), por ello definir lo que se entiende como contaminación plantea más problemas de los que en principio pudiera parecer sobre todo si como sucede frecuentemente se intenta relacionar de forma directa las ideas de calidad y contaminación.

En general se ha relacionado siempre el carácter de un agua como contaminada y la adecuación al uso que de ella se hace,

Figura 2.4 Suelo, zona no saturada y acuífero.



Según Bear (1982).

cuando -como veremos mas adelante- no siempre debería ser así. La legislación define contaminación del agua como «*La acción y el efecto de introducir materias o formas de energías, o introducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica*». El concepto de degradación del dominio público hidráulico a efectos de esta ley incluye las alteraciones perjudiciales del entorno afecto a dicho dominio.

Por su parte Custodio (1983) presenta la siguiente definición: «*Un curso de agua se considera polucionado cuando la composición o el estado de sus aguas son directa o indirectamente modificadas por la actividad del hombre en una medida tal que su utilización se ve restringida para todos o*

para algunos de aquellos usos para los que podría servir en estado natural »

De lo anteriormente expuesto se deduce que agua natural no es necesariamente sinónimo de calidad, un agua natural no tiene por que ser apta al uso que de ella queramos hacer como es el caso de aguas duras que son poco adecuadas para los circuitos de refrigeración pero pueden ser perfectamente utilizables para el consumo, en el caso opuesto, cuando un elevado contenido en nitratos desaconseja el uso del agua para bebida y sin embargo puede ser perfecta para el riego o circuitos de refrigeración.

**Vulnerabilidad, riesgo, afección.**

La definición más aceptada y también más intuitiva considera la vulnerabilidad como: "la sensibilidad de las aguas subterráneas a

### **3. COMPORTAMIENTO DE LOS MICROORGANISMOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA**

#### **3.1. Fundamentos**

#### **3.2. Desarrollo y supervivencia de los microorganismos en el agua**

3.2.1. *Influencia de factores físicos y químicos*

3.2.2. *Influencia de factores biológicos*

3.2.3. *Influencia del suelo y subsuelo*

#### **3.3. Factores que afectan al movimiento y supervivencia de bacterias en las aguas subterráneas**

#### **3.4. Factores que afectan al movimiento y supervivencia de los organismos patógenos en las aguas subterráneas**

#### **3.5. Factores que afectan al movimiento y supervivencia de virus en las aguas subterráneas**

#### **3.6. Microorganismos adheridos a la matriz sólida del terreno**

3.6.1. *Comportamiento de la micropoblación autóctona*

3.6.2. *Micropoblación en zonas contaminadas. Biodegradación*

#### **3.7. Aplicaciones de los microorganismos a la investigación hidrogeológica**

---

### 3.- COMPORTAMIENTO DE LOS MICROORGANISMOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA.

---

---

#### 3.1.- FUNDAMENTOS.

---

**H**ay tres principios básicos que es necesario tener en cuenta para comprender el comportamiento de los microorganismos vivos en el agua subterránea:

**1- Los microorganismos pueden estar en suspensión en el agua** o adheridos a superficies sólidas, ya sea a partículas en suspensión o a los materiales del acuífero. En función de su estado variará su transportabilidad. Generalmente solo una pequeña parte de los microorganismos se encuentran libres en el agua, y la mayoría se adhieren a superficies sólidas, donde encuentran adsorbidos los nutrientes necesarios para su crecimiento.

**2- El número de bacterias** en un medio natural concreto está condicionado por la limitación de nutrientes. Si a un medio se le añaden nutrientes, aumentará el número total de bacterias y si se le disminuyen se reducirá.

**3- La abundancia de una u otra especie** depende de su capacidad para utilizar los nutrientes disponibles, es decir que existe una competencia entre las especies, de modo que prolifera la mejor adaptada. Las bacterias forman auténticos

microecosistemas, en los que los productos de degradación del metabolismo de unas bacterias son utilizados por otras. Otro dato a tener en cuenta es la presencia de depredadores (microorganismos fagotrópicos) y virus específicos de las bacterias; unos y otros juegan un papel similar al de los depredadores y enfermedades en los ecosistemas de animales superiores.

La comparación con los ecosistemas de animales superiores, con los que se está más familiarizado, es de gran utilidad para comprender el comportamiento de los microorganismos. De hecho se trata de seres vivos y por tanto salvando la diferencia de escala se pueden trasladar al mundo microscópico muchos hechos habituales a escala superior.

Por ejemplo, el desarrollo de las plantas, con abundancia de los nutrientes principales (luz, CO<sub>2</sub>, agua), puede verse limitado por la ausencia de algunos componentes minerales, como nitrógeno, fósforo o potasio. Esto mismo ocurre en el mundo microscópico, donde la ausencia de algunos elementos minerales puede limitar el desarrollo bacteriano. En las aguas subterráneas suele haber suficiente cantidad de nitrógeno y potasio, y el fósforo es el nutriente mineral limitante. Es frecuente observar altas correlaciones entre contenido en fósforo y número de bacterias.

La mayor diferencia entre la microbiología de aguas superficiales y subterráneas radica en la ausencia de luz en estas últimas, mientras que en aguas superficiales juega un papel primordial. En las aguas superficiales existe un aporte continuo de materia orgánica por el desarrollo de algas

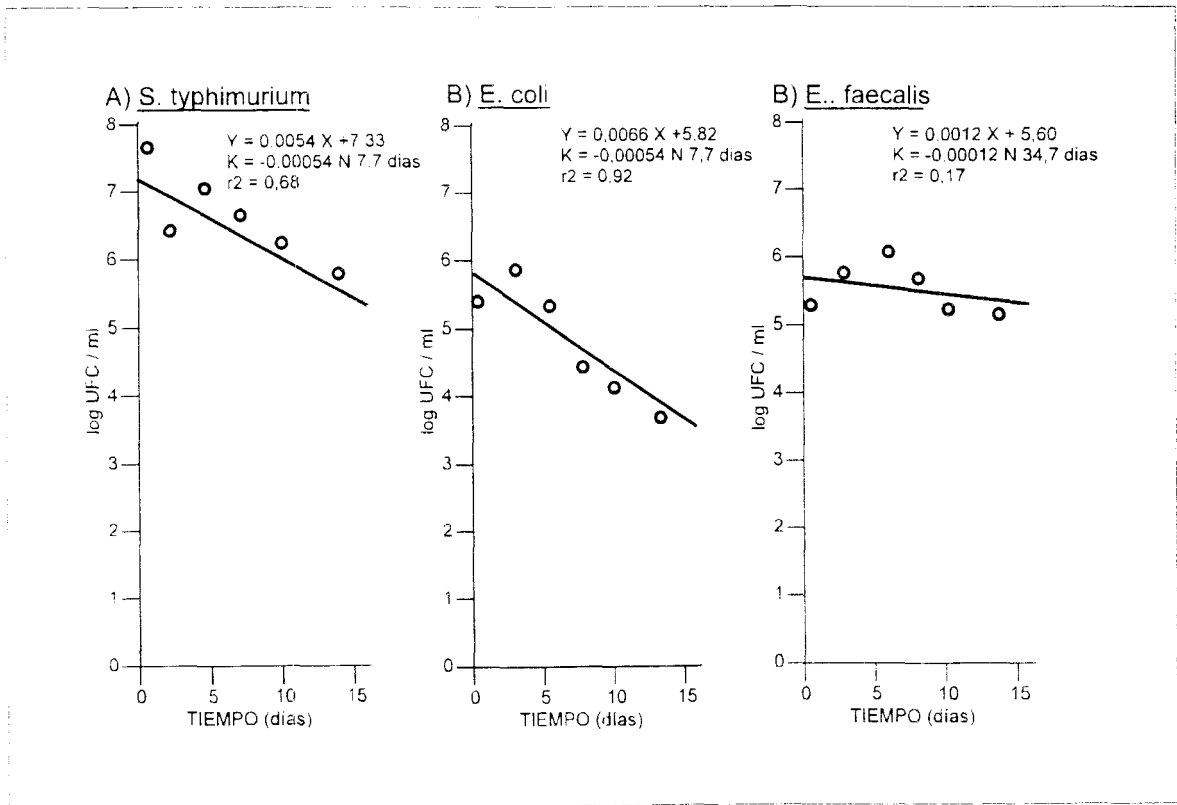
y bacterias fotosintéticas, fenómeno que no ocurre en aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas tienen con frecuencia mejor calidad microbiológica que las superficiales. Los factores que afectan en mayor medida a la

nutrientes. Además los microorganismos tienen un tamaño apreciable y pueden ser filtrados por niveles de arcillas.

- **Decantación.** De un modo similar a la filtración. La filtración es significativa en la zona no saturada, donde generalmente se

Figura 3.1.- Supervivencia de varios tipos de bacterias en aguas subterráneas. (Bitton et al 1983)



autodepuración de las aguas subterráneas son:

- **La competencia por los nutrientes**, que escasean según aumenta el tiempo de residencia del agua en el acuífero

- **La filtración.** Al filtrarse las partículas de materia orgánica las bacterias quedan sin

que atravesar capas de poca permeabilidad, mientras que la decantación tiene lugar en la zona saturada.

- **Las características físico-químicas** del medio, como la temperatura, el pH, las condiciones redox, la composición química del agua, etc., también condicionan la supervivencia de los microorganismos en

el agua subterránea. Normalmente, sin embargo, los márgenes de variación son muy pequeños: el agua subterránea suele tener condiciones oxidantes, pH neutro, y temperatura y salinidad medias.

---

### **3.2.- DESARROLLO Y SUPERVIVENCIA DE LOS MICROORGANISMOS EN EL AGUA.**

---

El crecimiento de microorganismos acuáticos está afectado por una gran variedad de factores físicos y químicos que pueden actuar complementaria o antagónicamente entre sí. Estos factores influyen no sólo en el tamaño y composición de las poblaciones microbianas, sino en la morfología y fisiología de sus componentes individuales, pudiendo producir cambios considerables en el metabolismo, morfología celular y reproducción, por todo ello, la supervivencia de los microorganismos en las aguas es muy variable, incluso para especies relacionadas (figura 3.1)

#### **3.2.1.- Influencia de factores físicos y químicos.**

##### **a) La luz**

La luz es un importante factor ecológico en el agua, siendo la fuente de energía de las algas y bacterias fotosintéticas. Su intensidad disminuye rápidamente a medida que penetra en el agua, pero sin embargo resulta biológicamente activa hasta una profundidad de 100 m o incluso 200 m en aguas muy claras sin color ni turbidez.

La luz solar tiene efectos inhibidores sobre las bacterias no pigmentadas, debido a la parte ultravioleta del espectro y a las longitudes de onda de la luz visible. Estos efectos dependen de la intensidad de la radiación y de la turbidez del agua, siendo máximos en aguas claras de regiones áridas. Las bacterias con pigmentos carotenoides, tolerantes a la luz en un grado considerable, no son inhibidas por la luz de intensidad normal. Por esta razón el aire contiene organismos con fuerte pigmentación.

Como se ha comentado anteriormente las aguas subterráneas se encuentran en total obscuridad excepto en el caso de pozos de gran diámetro en los que la luz solar puede llegar a la superficie del agua.

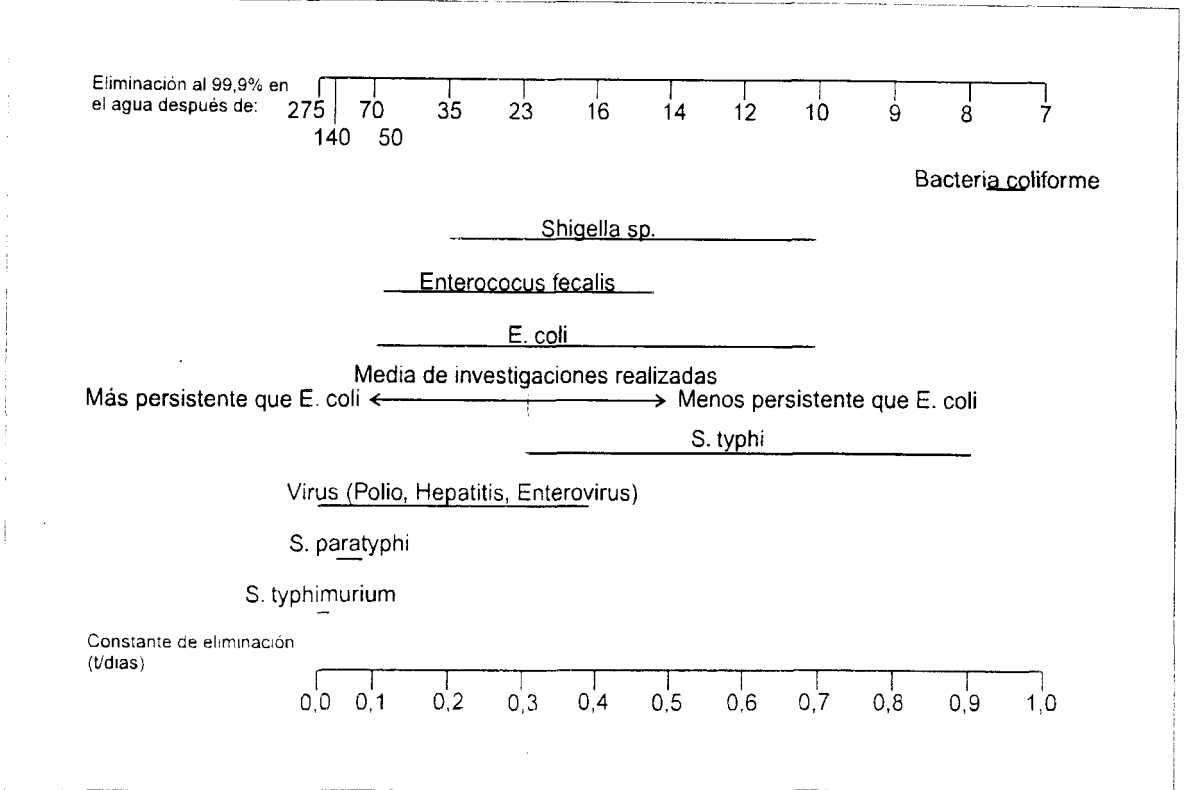
##### **b) Temperatura**

La temperatura afecta a los procesos vitales de todos los microorganismos, concretamente a la velocidad de crecimiento, necesidades de nutrientes y composición química y actividad enzimática de las células.

Existe una diversidad de bacterias capaces de vivir en un amplio rango de temperaturas. Aquellas cuyo óptimo desarrollo se sitúa a temperaturas medias se denominan mesófilas, para distinguirlas de las criófilas (adaptadas a bajas temperaturas) y termófilas (adaptadas a altas temperaturas).

A baja temperatura se ralentizan todos los procesos vitales, de modo que la multiplicación será más lenta (por ello la congelación conserva los alimentos) pero también los nutrientes durarán más y será

Figura 3.2.- Constante de eliminación y eliminación al 99,9% de las principales bacterias y virus en el agua subterránea. (Mathess 1985)



mayor la supervivencia de microorganismos patógenos.

Aproximadamente, un aumento de la temperatura de entre 6 y 15 °C provoca una duplicación en la velocidad de los procesos biológicos. La multiplicación de la mayoría de los microorganismos sigue esta ley hasta llegar a una temperatura máxima. Si se sobrepasa esta temperatura se produce rápidamente la muerte de la célula por daños irreversibles en el citoplasma. Por el contrario las bajas temperaturas raramente son letales.

Aunque hay unas pocas bacterias termófilas capaces de reproducirse a más de 100 °C (existentes en zonas volcánicas y campos

geotérmicos), muchas de ellas no son capaces de sobrevivir con 40 °C. Por ello la fiebre es un mecanismo de defensa del cuerpo humano.

Las aguas subterráneas tienen una temperatura poco variable y responden a la media anual de las temperaturas atmosféricas incrementando en el producto de la profundidad por el gradiente geotérmico.

### c) Presión

La presión hidrostática también afecta a los procesos biológicos de los microorganismos, y determina que puedan vivir en zonas más superficiales o más



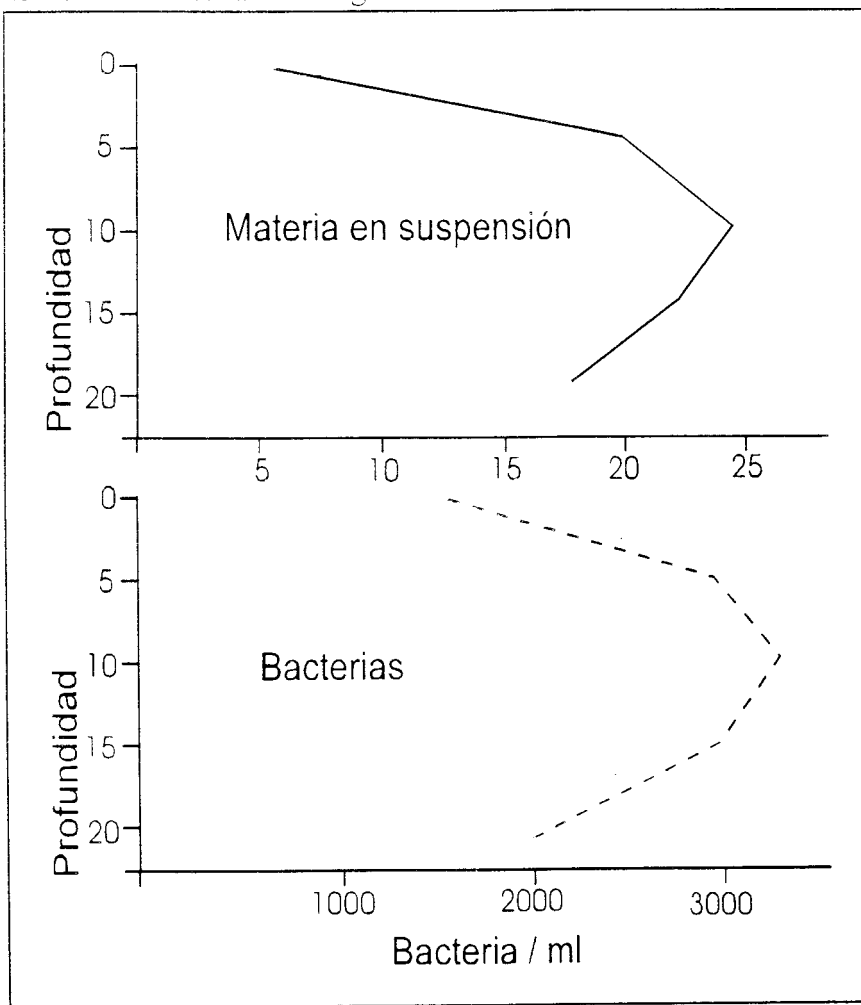
profundas. Sin embargo en la mayor parte de los casos el efecto de la presión es significativo solo con valores muy grandes, como por ejemplo a más de 100 atmósferas (1.000 metros de columna de agua). En un experimento de laboratorio se sometió a *E. coli* a un aumento de la presión de 1 000 atmósferas, sin que se observara un descenso en el número de células viables.

**d) Turbidez**

La materia en suspensión juega un papel importante como sustrato para muchos

microorganismos, que colonizan su superficie. Los microorganismos colonizan no sólo las partículas de materia orgánica, que pueden ser utilizadas directamente como alimento, sino también las partículas inorgánicas. Las partículas en suspensión, de origen orgánico o mineral, adsorben a su superficie los nutrientes y como consecuencia los microorganismos encuentran un ambiente nutricional más favorable en esta materia suspendida que libres en el agua. En aguas superficiales las partículas en suspensión suponen también una protección frente a los efectos dañinos de la luz.

Figura 3.3 - Distribución vertical de la materia en suspensión y del número de bacterias en el agua del mar Báltico. Rheinheimer 1980



Las partículas en suspensión, y por tanto la turbidez, tienen un efecto favorable sobre el crecimiento microbiano. Se ha encontrado un paralelismo importante entre la turbidez y el contenido en bacterias de las aguas de los ríos, del mar y de aguas subterráneas. (Figura 3.3)

Los valores de la turbidez y color para las aguas subterráneas suelen ser muy bajos, generalmente menores de 1 ppm para la turbidez y 5 ppm Pt para el color.

### **e) pH y potencial redox**

El crecimiento y la reproducción de los microorganismos están muy afectados por el pH del medio. Sin embargo el pH en las aguas subterráneas suele estar dentro del rango 6,5 - 8,5 que es el óptimo para la mayor parte de las bacterias.

El potencial redox afecta al metabolismo aerobio o anaerobio y por tanto al tipo de microorganismos presentes. Algunos incluso necesitan un rango concreto de Eh para sobrevivir o reproducirse. La mayoría de las aguas subterráneas tienen un potencial oxidante (medio aerobio). Variaciones del contenido en oxígeno, manteniéndose en condiciones francamente oxidantes, tienen poca influencia sobre las poblaciones bacterianas.

### **f) Salinidad**

Existen bacterias adaptadas a las aguas dulces y otras a aguas saladas (halófilas), incluso extremadamente salinas. Existen por tanto poblaciones diferentes en aguas continentales y en el mar. Pequeños cambios de salinidad en las aguas pueden inducir cambios importantes en su población microbiana, en las aguas subterráneas puede encontrarse un amplio margen de salinidades, desde aguas con conductividades inferiores a 100 microsiemens de corto tiempo de residencia y trayecto a través de materiales poco solubles, a aguas que habiendo atravesado formaciones evaporíticas adquieren conductividades de varios miles de microsiemens. En general las aguas subterráneas tienen una salinidad media.

### **g) Sustancias inorgánicas**

Existen elementos necesarios para la síntesis de las moléculas orgánicas de los seres vivos cuya ausencia de las aguas constituye un factor limitante al crecimiento y reproducción de éstos. Por lo general estas sustancias son el nitrógeno y el fósforo, y en las aguas subterráneas normalmente el elemento limitante es el fósforo.

Algunas bacterias pueden utilizar compuestos inorgánicos como fuente de energía o como fuente de oxígeno. Como fuente de energía es el caso de las bacterias nitrificantes, que obtienen la energía para su metabolismo de la oxidación del amoníaco a nitrito y de éste a nitrato. Como fuente de oxígeno por ejemplo es el caso de las bacterias desnitrificantes, que en condiciones anaerobias pueden utilizar el oxígeno de las moléculas de nitrato, dando como subproducto  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  o  $\text{N}_2$ .

### **h) Sustancias orgánicas**

La materia orgánica es la fuente de nutrientes para las bacterias heterótrofas presentes en el agua subterránea. Resulta por tanto evidente que existe una alta correlación entre contenido en materia orgánica y actividad biológica.

La concentración de materia orgánica no sólo determina el número de individuos sino también su tipo. Existen microorganismos capaces de crecer con concentraciones muy bajas en nutrientes, mientras que otros se adaptan a altos contenidos. La presencia de enzimas o sustancias bactericidas, generalmente producto del metabolismo de animales y plantas, también puede condicionar las

poblaciones microbianas.

**i) Gases disueltos**

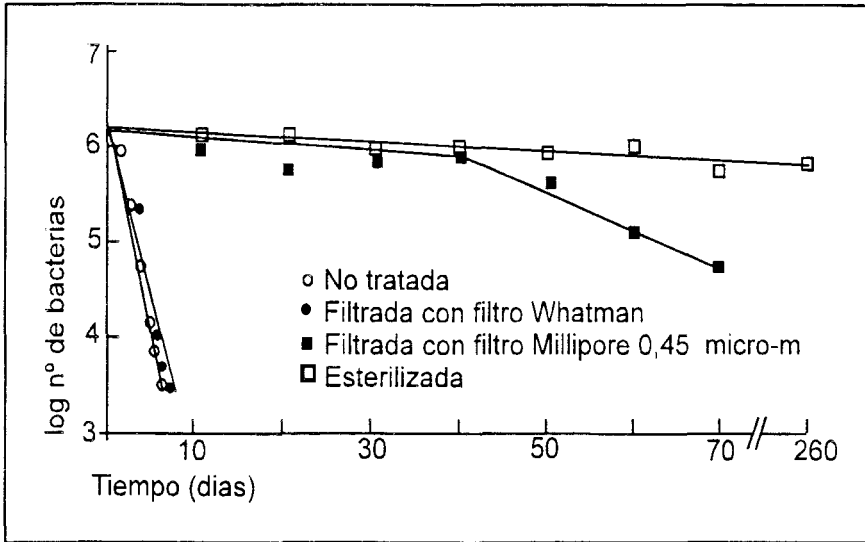
El oxígeno disuelto en el agua condiciona, como ya se ha visto, el tipo de microorganismos presentes en el agua y su metabolismo

crecimiento de muchos microorganismos pero constituye la fuente de energía de las bacterias que los oxidan si hay presencia de O<sub>2</sub>.

**j) Humedad**

El grado de humedad afecta a los microorganismos. Un ambiente húmedo permite el desarrollo de bacterias y hongos, mientras que la mayoría de microorganismos no sobreviven en condiciones de extrema sequedad. Este factor solo tiene importancia en superficie y en la zona no saturada, mientras que en la zona saturada y en cursos de agua superficial la

Figura 3.4.- Supervivencia de *E. coli* en agua de río. Flint 1987



El nitrógeno (N<sub>2</sub>) no afecta a la microflora acuática.

El CO<sub>2</sub> es necesario para muchos microorganismos, en particular muchas bacterias autótrofas y fotosintéticas. Sin embargo muy raramente podrá ser un factor limitante en las aguas subterráneas pues se produce abundantemente en el suelo como consecuencia de la respiración de las raíces y de la microflora y microfauna presentes.

Otros gases, como el CO o el SH<sub>2</sub> pueden existir en zonas contaminadas como consecuencia del metabolismo de las bacterias. Su presencia inhibe el

humedad es lógicamente del 100%.

**3.2.2.- Influencia de factores biológicos**

Además de los factores físicos y químicos, los biológicos también afectan a los microorganismos acuáticos, en el sentido de que los individuos componentes de una comunidad pueden ayudarse o inhibirse entre sí. La competencia por los nutrientes, entre los propios microorganismos y con otros seres superiores, es de gran importancia, así como el hecho de que muchos microorganismos son parasitados y fagocitados por otros.

Algunas especies sintetizan sustancias bactericidas o bacteriostáticas, que inhiben el crecimiento de otros microorganismos. Este es el caso por ejemplo de los antibióticos producidos por los hongos, que no son perjudiciales para ellos mientras que son letales para las bacterias.

**a) Competencia por los nutrientes**

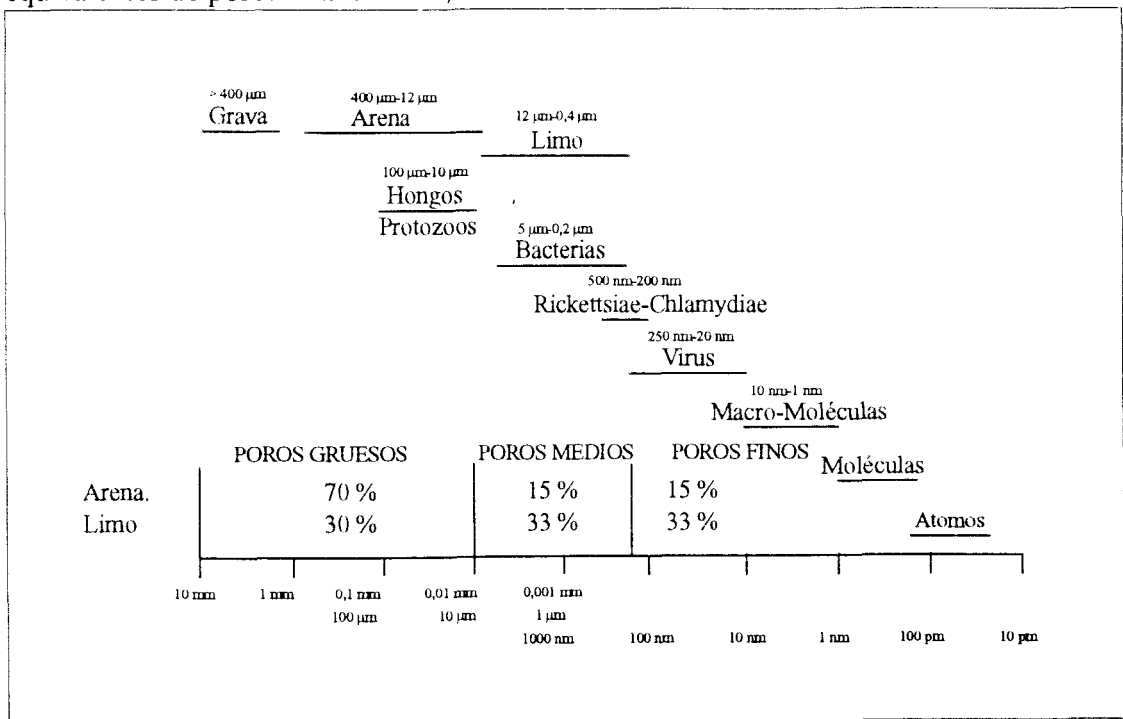
En todos los hábitats la competencia nutricional entre organismos juega un papel importante en la composición de la micropoblación. En esta lucha por conseguir nutrientes, los organismos que tienen más éxito son los que, bajo ciertas condiciones, son los más rápidos en alcanzar los nutrientes disponibles. La competencia puede ser por la fuente de energía o por cualquier otro factor limitante del crecimiento. A modo de ejemplo, Güde

(1.985) observó que en presencia de bacterias disminuye la cantidad de algas, debido a la eficiente competencia de las bacterias por el fósforo.

Flint (1.987) experimentó con el tiempo de supervivencia de las bacterias (*E. coli*, en concreto) en un agua de río bajo diferentes condiciones de temperatura y desinfección. El resultado obtenido es concluyente: la supervivencia es muy grande (más de 260 días) en agua estéril (es decir, sin otros organismos competidores), menor en agua filtrada y mínima (de 2 a 20 días) en agua no tratada (ver figura 3.4).

Pero no todos los organismos que se nutren de las mismas sustancias son necesariamente competidores. Existen ejemplos de que los nutrientes pueden ser utilizados solo por la actividad coordinada

Figura 3.5.- Comparación y tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes de poro. Matthes et al, 1988.



de varios tipos de organismos. Así, *Escherichia coli* y *Proteus vulgaris* se complementan mutuamente en su nutrición. En el mundo microscópico se dan casos de parasitismo, comensalismo y simbiosis.

Bajo condiciones ambientales extremas la competición por los nutrientes puede ser relegada a un papel secundario; en aguas con valores de pH, temperatura o salinidad extremos sólo unos pocos microorganismos serán capaces de utilizar los nutrientes disponibles.

#### **b) Competencia con otros microorganismos.**

Son muchos los seres presentes en el agua que se alimentan de microorganismos. La mayoría de los protozoos viven, al menos parcialmente, a costa de las bacterias. Güde (1.985) encontró que en presencia de protozoos disminuye drásticamente el número de algas y bacterias de un medio de cultivo experimental a los pocos días de haberse iniciado el experimento.

Los microorganismos acuáticos también son parasitados por virus, bacterias y hongos. De especial importancia son los bacteriófagos (virus específicos de las bacterias), que son particularmente numerosos en aguas residuales y probablemente intervienen en la disminución del número de bacterias en aguas donde se vierten estos residuos.

Existen fagos que infectan a bacterias patógenas, como *Salmonella*, y fagos específicos de bacterias acuáticas autóctonas.

### **3.2.3.- Influencia del suelo y subsuelo**

Además de las características ambientales del medio, hay fenómenos físicos que se producen ante la presencia de un sustrato sólido (un suelo, por ejemplo) o como consecuencia del movimiento de los microorganismos en el agua. En concreto la naturaleza del terreno condiciona la calidad microbiológica de las aguas tanto o más que los factores ambientales antes comentados. Los procesos físicos que tienen relación con la naturaleza del terreno son:

#### **a) Filtración**

Las partículas sólidas en suspensión en el agua pueden ser filtradas por el terreno si los poros de éste son de pequeño tamaño. Las bacterias adheridas a estas partículas quedarán también retenidas, por lo que el contenido de bacterias del agua disminuirá. Además, muchos microorganismos tienen un tamaño apreciable por lo que pueden ser filtrados directamente. Esto afecta a las bacterias, pero especialmente a los hongos y protozoos (ver figura 3.5).

La filtración es poco significativa en acuíferos kársticos y es máxima cuando el agua atraviesa perpendicularmente capas potentes de arcillas o margas, lo que normalmente ocurre en la zona no saturada de acuíferos detríticos.

#### **b) Adsorción**

Los microorganismos de menor tamaño pueden quedar retenidos en las partículas arcillosas del suelo por adsorción. El proceso se realiza sobre arcillas saturadas en cationes y con exceso de cargas positivas y es reversible.

El proceso de adsorción es significativo para los virus y sigue las mismas leyes que la adsorción para otros compuestos orgánicos (tabla 3.1).

**c) Convección, dilución, dispersión**

Los microorganismos libres en el agua o adheridos a partículas en suspensión son arrastrados por los movimientos del agua y por tanto están sujetos a los procesos que sufriría un soluto conservativo.

**d) Decantación o sedimentación**

Al reducirse la velocidad del agua, las partículas de materia en suspensión pueden decantar hasta sedimentarse sobre la matriz

muchos lagos. La decantación es al menos parcialmente reversible: si aumenta la velocidad del medio las partículas sedimentadas pueden removilizarse.

---

**3.3.- FACTORES QUE AFECTAN AL MOVIMIENTO Y SUPERVIVENCIA DE BACTERIAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

---

Se comenta aquí el comportamiento de las bacterias en general, habiendo reservado el apartado siguiente a las patógenas. No será objeto de discusión aquí la micropoblación adherida a la matriz sólida del terreno, ya

Tabla 3.1.- Influencia del contenido en materia orgánica - Adsorción de poliovirus 2 por los suelos y minerales.

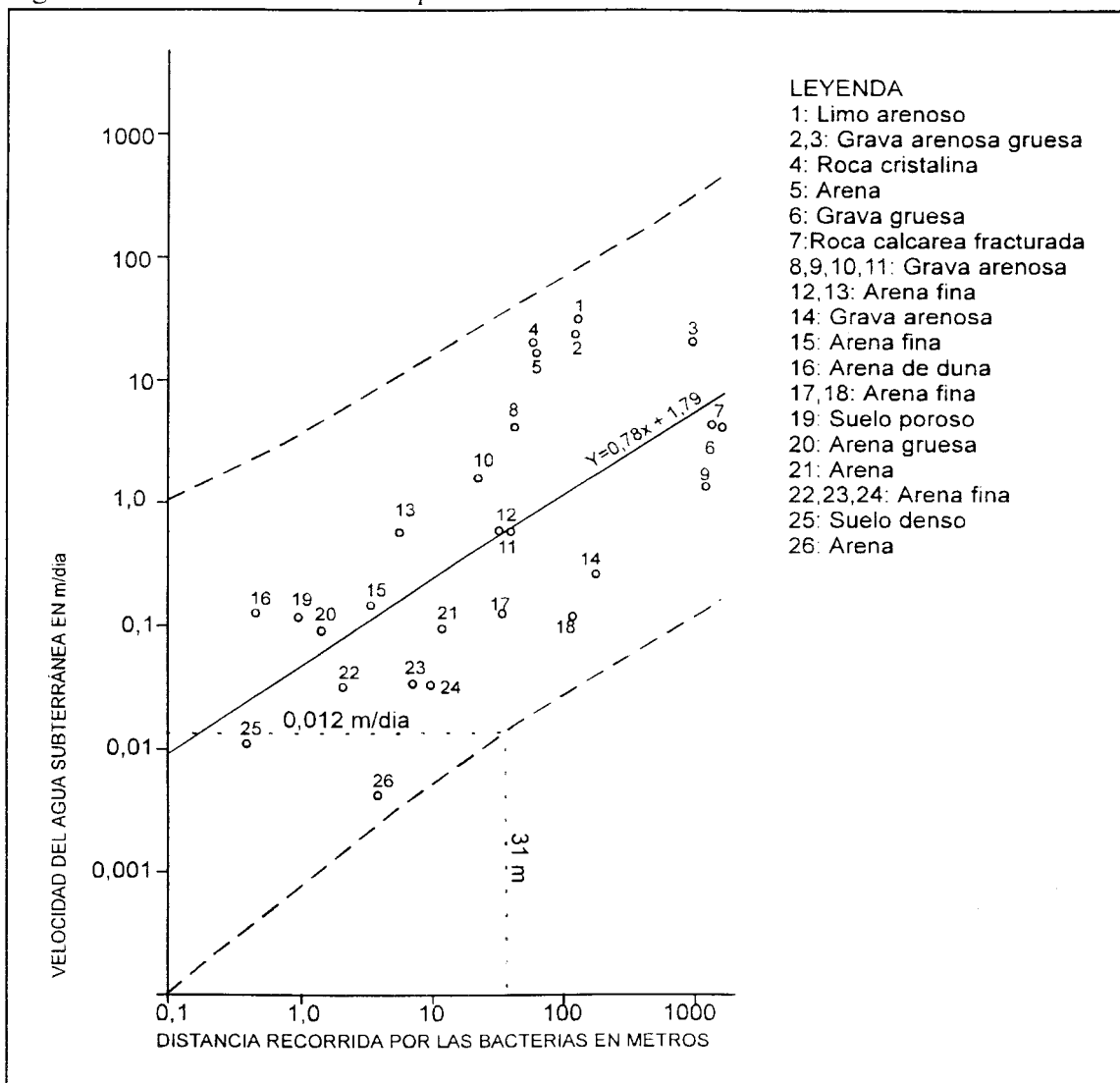
	pH	Carbono orgánico (mg/g)	Capacidad de adsorción del poadma (mg/m <sup>3</sup> )	% Adsorción Poliovirus	
				Media	Mínima
Tierra Arcillosa	7,6	16	1,1	75	43
Turba	7,2	200	14	79	16
Oxido de hierro hidratado	7,1	0	0,0005	99,99	99,99
Magnetita	8,9	0,4	0,06	99,98	99,94

Fuente: Matthes et al 1988.

sólida. Este proceso ocurre en la zona saturada de los acuíferos, así como en

que no es transportada por el agua subterránea; se hablará de ella como

Figura 3.6.- Distancia recorrida por las bacterias en medio saturado. Mac Ginnis 1983



micropoblación autóctona, aún cuando en zonas contaminadas su composición puede estar totalmente alterada

### a) El clima

El clima influye en la supervivencia bacteriana a través de tres de sus componentes fundamentales: la temperatura, las precipitaciones y la radiación solar. Los climas fríos, lluviosos

y con pequeña insolación permiten una prolongada supervivencia de las bacterias exógenas al proporcionar un medio poco activo y poco agresivo.

### b) El suelo

El suelo modifica la composición microbiana de las aguas subterráneas debido a procesos de filtración y adsorción, a los valores de pH y contenido

en materia orgánica y a la competencia con la micropoblación autóctona. En algunas experiencias se encontró que del 92 al 97% de las bacterias se eliminaban en el primer centímetro del suelo<sup>5</sup>. Sin embargo esta propiedad depende de la naturaleza del suelo; así, en un suelo arenoso (de los que existen en grandes extensiones en nuestro país) la filtración es mucho menos efectiva que en uno arcilloso. La adsorción retarda ligeramente el transporte de las bacterias. Suelos muy ácidos impiden la supervivencia de muchos microorganismos, mientras que

materia orgánica del suelo, como fuente de energía, permite mantener el metabolismo de las bacterias y por tanto su supervivencia. La competencia con la micropoblación autóctona del suelo es en gran medida responsable de su eventual desaparición del mismo, en combinación con la filtración. Por ejemplo los actinomicetos son capaces de detener el crecimiento de *Salmonella* y del bacilo de la disenteria (*Shigella*), del mismo modo los protozoos del suelo juegan un papel importante en la desaparición de *E. coli*.

Tabla 3.2.- Influencia del tipo de virus, profundidad de infiltración de enterovirus en un columna de arena. % de virus recuperados

Profundidad (cm)	Polio 1	Echo 7	Cox A9	Cox B1
1	26,08	58,70	7,55	30,03
2	55,05	22,30	13,60	30,00
3	14,49	10,55	28,71	30,00
4	2,61	5,86	29,00	7,9
5	1,45	1,05	15,77	1,42
6	0,26	1,05	2,87	0,30
7	0,03	0,22	0,75	0,14
8	0,026	0,1	0,75	0,08
9	0,014	0,1	0,70	0,003
10	0,003	0,06	0,29	0,001
11	<0,0001	0,0001	0,25	0,0001

Fuente: Dizer et al, 1985

no tienen ningún efecto sobre otros. La

---

<sup>5</sup> Este dato, aunque figura en la bibliografía es de dudosa exactitud, normalmente los ensayos se realizan en laboratorio sobre columnas artificiales de material compactado, en condiciones naturales las bacterias se mueven a través de caminos preferenciales (microfisuras o microfracturas) alcanzando profundidades mucho mayores.

### c) La zona no saturada

En la zona no saturada los factores son similares a los del suelo. Sin embargo aquí el factor de mayor importancia es la naturaleza de los materiales que el agua tiene que atravesar verticalmente. En rocas fracturadas y especialmente en acuíferos kársticos la circulación por la zona no



saturada es muy rápida y no hay filtración. La máxima filtración se produce cuando el agua tiene que atravesar un cierto espesor de materiales poco permeables (acuitardos, como arcillas o margas) antes de llegar a la zona saturada. En este caso se produce de un modo natural una depuración muy efectiva de las aguas.

#### **d) La zona saturada**

El movimiento de las bacterias en la zona saturada responde a un modelo de transporte coloidal. La filtración no suele ser efectiva, ya que el agua circula mayoritariamente por los huecos de mayor tamaño. Por el contrario la decantación o sedimentación son importantes recordemos que las bacterias se comportan en el agua subterránea de un modo similar a la turbidez. Como siempre, es importante la competencia con la micropoblación autóctona adherida a la matriz sólida del acuífero. No obstante, esta competencia solo tiene lugar cuando decanta la partícula de materia a la que están adheridas las bacterias; mientras dicha partícula está en suspensión acuática su micropoblación asociada es estable.

---

### **3.4.- FACTORES QUE AFECTAN AL MOVIMIENTO Y SUPERVIVENCIA DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

---

Los microorganismos entéricos encuentran habitualmente en el subsuelo un medio hostil, donde es difícil su supervivencia a largo plazo. Esto no es extensivo para

todos los patógenos; por ejemplo algunas cepas de *Pseudomonas aeruginosa*, una bacteria común en suelos, pueden ser patógenas.

Todos los factores comentados anteriormente para las bacterias transportadas por el agua en general, son extensivas a los microorganismos entéricos. De este modo las bajas temperaturas, alto grado de humedad, pH neutro, abundantes nutrientes y protección contra la luz solar son factores que permiten una larga supervivencia.

En relación con otras bacterias, cobra ahora importancia la abundancia de nutrientes. En aguas pobres en nutrientes y enzimáticamente deficientes, las bacterias entéricas están incapacitadas para disminuir sus necesidades metabólicas y por tanto su supervivencia es limitada. En cambio, si la dilución es insuficiente aumenta el tiempo de supervivencia.

También la competencia con otras bacterias tiene una gran importancia. Oragui y Mara (1983) investigaron sobre la supervivencia de ciertas bacterias indicadoras de contaminación fecal, encontrando que en aguas dulces *Rhodococcus coprophilus* y *Clostridium perfringens* sobrevivieron durante 17 semanas, y *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis* durante 5 semanas. *Rhodococcus coprophilus* sobrevivió entre 12 y 26 semanas en aguas residuales sin tratar y más de 8 meses en aguas residuales esterilizadas y en aguas desionizadas.

En aguas subterráneas, caracterizadas por una gran escasez de nutrientes, estas bacterias pueden sobrevivir cuando están adheridas a partículas de materia, en las que encuentran los nutrientes necesarios. Las

Tabla 3.3 - Constantes de inactivación de virus en aguas subterráneas a 10 +/- 1°C durante un tiempo de observación de 260 días.

Condiciones	Virus			
	Coxsackie B1	Coxsackie A9	Echo 7	Polio 1
Agua subterránea no tratada	0,0186	0,0265	0,0186	0,0129
A S desionizada	0,0401	0,0314	0,0382	0,0322
A S en autoclave	0,0123	0,0189	0,03220	0,0103
A S en autoclave + arena gruesa	0,00927	0,0301	0,0123	0,0163
A S en autoclave + arena media	0,0146	0,0311	0,0175	0,0276
A.S en autoclave + arena fina	0,0084		0,0157	0,0177

Fuente: Matthes et al, 1982

Tabla 3.4.- Supervivencia de los virus en las aguas subterráneas y en el suelo.

Virus	Aguas Subterráneas	Suelo
Virus en general	>= 28 días	--
Poliovirus	>= 250 días	91 -175 días
Coxsackie A5, A14	>= 20 días	--
Colifagos X174, T4	>= 7 días	--
Enterovirus	--	15 - 25 días en suelo seco
Echovirus 1	--	21 días en suelo seco

Fuente: Benito de Santos, 1987.

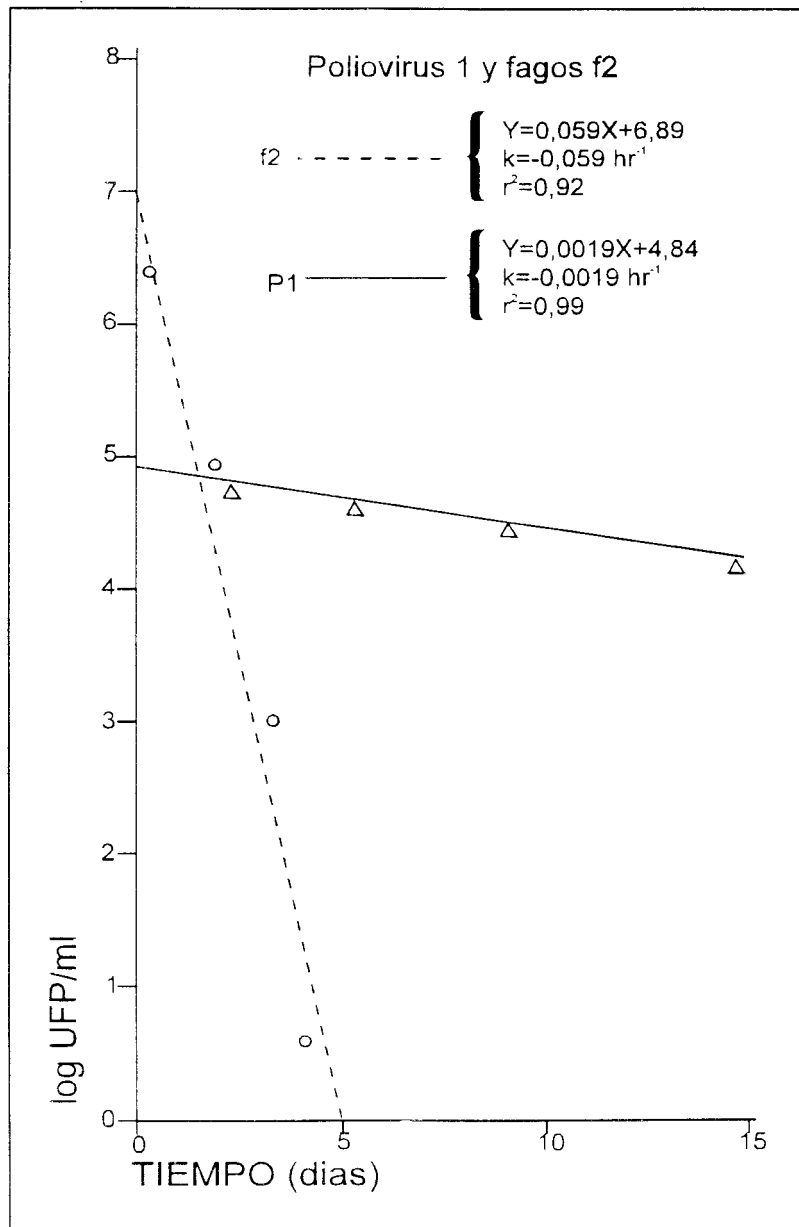
innumerables partículas de materia orgánica en que se dividen las excreciones humanas forman unos microecosistemas favorables para estos microorganismos. El modelo conceptual es que cada partícula de materia orgánica queda rodeada por una esfera de microorganismos. Estas partículas se mueven en el agua del mismo modo que las partículas de turbidez. El transporte de bacterias fecales en un acuífero sigue las mismas leyes que la turbidez.

Si un acuífero posee en la zona no saturada niveles de arcillas de suficiente espesor,

filtrarán las partículas de materia orgánica y se producirá una depuración efectiva de estas bacterias. Del mismo modo, si el flujo es suficientemente lento las partículas pueden decantar dentro de la zona saturada. En el otro extremo, acuíferos kársticos con circulación rápida e infiltración por conductos preferenciales tienen una pequeña depuración, y la contaminación puede atravesar grandes distancias y ser persistente durante mucho tiempo. Un aumento de la velocidad del medio, producido por ejemplo por una lluvia puntual, provocará por

Figura 3.5.- Supervivencia en agua subterránea de dos tipos de virus (Poliovirus 1, Bacteriófagos f2)

Bitton y col. 1983



Resaltemos un hecho importante, derivado de la adherencia de bacterias a las partículas de materia orgánica en suspensión: aunque haya oxígeno en el agua, es posible que dentro de un flóculo en suspensión haya condiciones anaerobias. Esto explica la presencia ocasional de procesos propios de un medio anaerobio estricto, e incluso la supervivencia y transporte de bacterias anaerobias en medio aerobio.

### 3.5.- FACTORES QUE AFECTAN AL MOVIMIENTO Y SUPERVIVENCIA DE VIRUS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los virus se mueven en el agua siguiendo leyes diferentes a las bacterias y otros organismos vivos. Su comportamiento se parece más al de moléculas orgánicas

removilización un empeoramiento de la calidad aún antes de que las aguas infiltradas en el chubasco lleguen al punto muestreado (del mismo modo que ocurre con la turbidez).

complejas, tales como pesticidas, CFC, etc. Al tener menor tamaño que las bacterias, los virus son más difícilmente filtrables que éstas. Al tratarse de compuestos en disolución, no son decantables. Al no tener metabolismo no dependen de la concentración de nutrientes en el medio, ni

presentan competencia entre unas especies y otras.

#### **a) El clima**

La temperatura, el grado de humedad, y la radiación solar influyen en la supervivencia de los virus, que es mayor a bajas temperaturas, alto grado de humedad y protección frente a la radiación solar. Se ha comprobado que los virus no sobreviven más de 15 a 25 días en suelos desecados al aire, mientras que pueden permanecer 60 a 90 días con un 10 % de humedad (tabla 3.4).

#### **b) El suelo**

Los factores que más afectan en el suelo son la adsorción, que retrasa el transporte, y la presencia de una micropoblación autóctona que disminuye su supervivencia. Los virus son adsorbidos por las arcillas del suelo en un porcentaje independiente de su concentración en el agua. La adsorción es mayor en suelos arcillosos que arenosos, y depende de diversos parámetros entre los que destacaremos la presencia de materia orgánica soluble. Muchos compuestos orgánicos compiten con los virus por los lugares de adsorción por lo que aumentan la transportabilidad de éstos. Se ha comprobado que los virus sobreviven más en suelos estériles que en suelos no estériles, lo que demuestra la importancia de la flora bacteriana natural en su eliminación.

#### **c) La zona no saturada**

Al igual que en el suelo, los principales factores son la adsorción y la presencia de la micropoblación autóctona. Si el agua

tiene que atravesar niveles de arcillas con gran capacidad de adsorción la depuración puede ser importante. Si la infiltración se realiza por conductos preferenciales, como en rocas fracturadas o zonas kársticas, no existe depuración.

#### **d) La zona saturada**

En la zona saturada la adsorción es menor, dado que generalmente la mayor parte del flujo se realiza a través de niveles de alta permeabilidad, con poco contenido de arcillas. El potencial redox del agua es muy importante: al igual que otros compuestos orgánicos, su degradación biológica se ve favorecida por condiciones oxidantes mientras que en medio anaerobio puede prolongarse su supervivencia. Es decir, en zonas contaminadas la supervivencia de los virus puede ser muy superior a la encontrada en aguas naturales de buena calidad, en las que ya de por sí se acepta que pueden sobrevivir periodos prolongados y recorrer grandes distancias, mayores que las bacterias fecales.

---

### **3.6.- MICROORGANISMOS ADHERIDOS A LA MATRIZ SÓLIDA DEL TERRENO**

---

En el medio subterráneo, la mayor parte de los microorganismos se encuentran adheridos a la matriz sólida, y solo una pequeña parte está libre en el agua o adherida a partículas en suspensión.

La presencia de esta micropoblación natural ha de considerarse un hecho favorable, ya que contribuye a la buena calidad del agua y raramente puede ser

considerada como una contaminación. Su comportamiento sigue los principios básicos descritos en el apartado de fundamentos.

### **3.6.1.- Comportamiento de la micropoblación autóctona.**

En condiciones naturales, el agua de lluvia infiltra en el terreno saturada en oxígeno, acompañada de una cierta cantidad de materia orgánica, que proviene de hojas de árboles, plantas muertas, excreciones animales y animales muertos.

Esta materia orgánica es objeto de degradación, especialmente en el suelo, donde existe una gran actividad biológica. En la zona no saturada se continúan degradando los cada vez más escasos nutrientes. Generalmente hay una circulación de aire suficiente para permitir la degradación en medio aerobio, manteniendo el agua un alto contenido en oxígeno disuelto. La circulación del aire es debida a diferencias de presión en el exterior y a la alternancia de periodos secos y húmedos. La actividad biológica no es homogénea sino que puede variar en función de la alternancia de diferentes materiales. En líneas generales va disminuyendo en profundidad. Dado que localmente puede haber condiciones anaerobias, muchas bacterias de los suelos pueden sobrevivir en estas condiciones. Como ejemplo citaremos las bacterias desnitrificantes, con metabolismo aerobio, que pueden utilizar el oxígeno del nitrato en ausencia de oxígeno libre. Las condiciones de oxidación, nutrientes, etc, de un suelo pueden variar a escala centimétrica. Por ello es muy variable también la composición de la microflora

asociada.

En la zona saturada los nutrientes disponibles son muy escasos: queda muy poca materia orgánica, el amoníaco y nitrito han sido oxidados a nitrato y tan sólo quedan en disolución unos pocos compuestos orgánicos de difícil degradación, así como partículas de materia insolubles cuya decantación constituye un lento aporte de nutrientes. Dado que el contenido en oxígeno sigue siendo suficiente (se supone aquí que no hay contaminación), la mayor parte de los microorganismos tiene un metabolismo aerobio.

### **3.6.2.- Micropoblación en zonas contaminadas. Biodegradación de contaminantes**

La micropoblación propia del acuífero está limitada, como se había indicado, por la escasez de nutrientes. Si se añaden nutrientes a un acuífero, por ejemplo residuos orgánicos, se provoca un aumento de la población microbiana aún cuando se hubiera vertido un producto estéril.

Aunque la mayor parte de las bacterias del acuífero no son móviles, por estar adheridas a las superficies sólidas, el transporte de los nutrientes por el agua hará que la zona con proliferación anormal avance al hacerlo la mancha contaminada. Dado que según avanza la mancha contaminada son diferentes las concentraciones de los distintos nutrientes (aumentan por ejemplo los productos de desecho de las primeras bacterias y disminuyen los productos originales), y muchas veces también varían las condiciones redox, es normal que a lo largo

de una línea de flujo se vayan sucediendo distintas especies bacterianas.

Como ejemplo ilustrativo se exponen algunos procesos que ocurren en el medio subterráneo cuando se realiza un vertido accidental de glucosa en gran cantidad (figura 3.8)

- Inmediatamente al vertido, proliferarán bacterias aerobias, que consumirán el oxígeno del agua hasta producir condiciones de anaerobiosis

- A partir de este momento proliferarán bacterias fermentativas, que transformarán la glucosa en  $\text{CO}_2$  y en etanol, ácidos orgánicos (láctico, acético, fórmico) o hidrógeno. Una segunda etapa de fermentación usará las cadenas mayores, dando como productos finales  $\text{CO}_2$ , acetato, formiato y  $\text{H}_2$

- Paralelamente, las bacterias reductoras de nitratos metabolizarán la glucosa, etanol y ácidos orgánicos transformándolos en  $\text{CO}_2$  y agua, produciendo una desnitrificación del medio hasta agotar el nitrato del agua.

- Una vez que el medio se haga suficientemente reductor (no basta con la simple ausencia de oxígeno) proliferarán las bacterias reductoras de sulfatos, que transformarán los productos de degradación de las bacterias fermentativas en  $\text{CO}_2$  y agua, provocando una reducción del ion sulfato en sulfuro. El sulfhídrico formado podrá combinarse con hierro o manganeso formando precipitados insolubles, y/o permanecer disuelto en el agua, dándole un olor desagradable característico

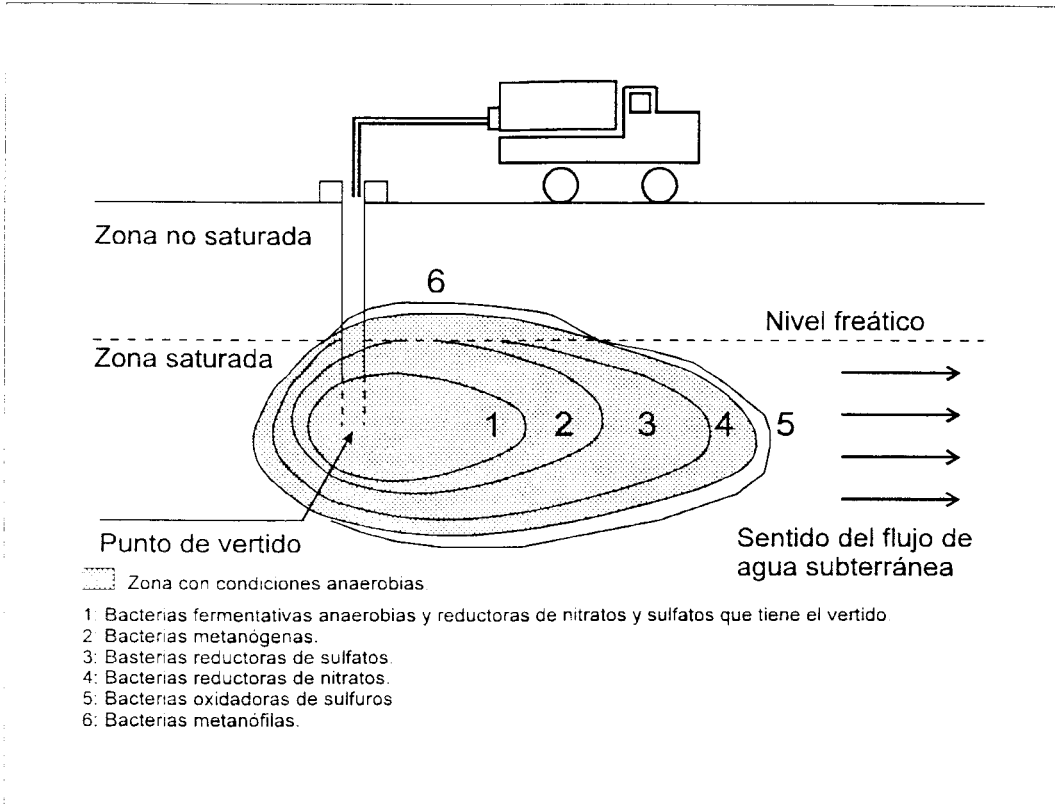
- Cuando se agoten los sulfatos (o se reduzcan a valores pequeños) predominarán las bacterias metanógenas, que reducen el  $\text{CO}_2$  y los productos de degradación de las bacterias fermentativas en metano y agua. Este metano migrará verticalmente hasta el suelo, donde reinan condiciones aerobias y servirá de sustrato a las bacterias metófilas, que lo combinarán con el oxígeno para formar  $\text{CO}_2$  y agua, cerrando el ciclo

- Cuando las aguas contaminadas, exhaustas ya de materia orgánica, se mezclen con aguas no contaminadas del acuífero, las bacterias oxidadoras de sulfuros los transformarán en sulfato a expensas de reducir el oxígeno del agua. En ciertas condiciones puede formarse azufre elemental, siendo éste el mecanismo de formación de muchos depósitos minerales de azufre

Tanto las bacterias que oxidan el metano (metanófilas) como las oxidadoras de sulfuros proliferarán exactamente en el límite entre la zona reductora y la oxidante, de modo que en el momento en el que vuelve a haber condiciones oxidantes ya está cerrado el proceso de degradación de la contaminación original.

En ocasiones todas estas bacterias forman parte de la micropoblación autóctona o se encuentran formando parte del vertido. En

Figura 3.8.- Contaminación de un acuífero por un vertido de materia orgánica en la zona saturada a través de un pozo.



caso contrario, o si se encuentran en número insuficiente, puede ser necesario añadirlas artificialmente.

Si se vierte un compuesto de más difícil degradación, o si el volumen de vertido es demasiado elevado, puede ser necesario estimular artificialmente la degradación biológica, cambiando las condiciones del medio. Un ejemplo puede ser un vertido accidental de hidrocarburos

Supongamos que casualmente existen en el acuífero bacterias capaces de degradar los hidrocarburos (si no es así, es necesario añadirlas artificialmente). Estas bacterias degradarán los hidrocarburos disueltos en el agua (posiblemente habrá que aumentar

su dilución con el uso de tensioactivos) hasta consumir el oxígeno disuelto. A partir de este punto la degradación cesará, ya que no existe ninguna bacteria capaz de degradar los hidrocarburos en medio anaerobio estricto (por eso se conservan los campos de petróleo desde hace millones de años). A partir de este momento es necesario aplicar técnicas de descontaminación específicas, entre las que destacaremos:

- Circulación forzada de aire. Es aplicable solo cuando el contaminante está todavía en la zona no saturada o los primeros metros de la zona saturada. Se perforan sondeos por los que se hace circular aire. En el caso de hidrocarburos ligeros, una

fracción significativa es extraída con el aire de retorno, que debe ser depurado (volatilización in situ, ISV).

- Inyección de nitratos (u otro aceptor de electrones, como sulfato u óxido de hierro). Una vez que los hidrocarburos están en la zona saturada, no es práctico introducir aire debido a su pequeña solubilidad y a los altos consumos energéticos que ello conllevaría. Una alternativa es añadir agua con un alto contenido en nitratos, como aceptor de electrones. Existen bacterias capaces de degradar hidrocarburos en medio anaerobio utilizando el oxígeno del nitrato y descomponiendo por tanto a éste, por lo que el nitrato no supone una contaminación adicional.

- Extracción del agua y tratamiento en el exterior. Si los hidrocarburos forman una fase diferente que el agua, es posible bombearlos separadamente.

- Otras técnicas particulares de casos concretos, como adición de otro material nutriente, para productos que no pueden ser degradados directamente pero sí co-metabólicamente (las bacterias necesitan otro nutriente para su desarrollo), o adición de fertilizantes para aumentar la actividad biológica.

---

### 3.7.- APLICACIONES DE LOS MICROORGANISMOS A LA INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA

---

Muchos de los fenómenos anteriormente descritos presentan una fuerte dependencia con la naturaleza del terreno. Por ello en ocasiones los análisis microbiológicos pueden servir para investigar el medio subterráneo, en especial los procesos de recarga y la naturaleza de la zona no saturada.

Entre las principales aplicaciones hidrogeológicas cabe destacar:

- Como trazadores naturales, especialmente en acuíferos kársticos. Es preciso tener en cuenta que la removilización de partículas sedimentadas puede inducir a error si no es considerada. También sirven para medir el tiempo que tarda una precipitación en llegar a la zona saturada en acuíferos detriticos.

- Para estimar la edad de las aguas. Sirve tan sólo para aguas muy recientes, pero en muchos casos evitará realizar análisis isotópicos. Es de especial interés su utilización para detectar la mezcla con aguas recientes. La presencia de coliformes, especialmente fecales, es indicativa de un tiempo de residencia reducido.

- Para ver la vulnerabilidad del acuífero a otros tipos de contaminación. Si el número de microorganismos es elevado el acuífero es vulnerable.



- Para estimar la viabilidad de recarga artificial en balsas La presencia de bacterias fecales en un acuífero es una prueba de que la permeabilidad vertical es suficientemente grande y que hay huecos de suficiente tamaño

En la mayoría de estos casos el resultado solo es concluyente si es positivo; es decir, si hay bacterias fecales se concluye que hay poros de suficiente tamaño pero si no hay bacterias fecales muchas veces no se puede concluir nada.

Al igual que los análisis químicos, las bacterias pueden servir para determinar el carácter influyente/efluente de un río, para conocer la procedencia de una muestra de agua y para ver la dirección del agua subterránea. Las ventajas de una u otra técnica dependen de las circunstancias concretas de cada caso.

Se pueden utilizar cultivos de bacterias como trazadores, pero esta técnica no es muy aconsejable por los cambios no

predecibles que podrían producirse en las poblaciones microbianas (téngase en cuenta que es necesario introducir bacterias diferentes de las que existen de un modo natural)

una alteración de la composición originada por actividades de origen antrópico", según esta definición la vulnerabilidad está condicionada por características intrínsecas a la formación acuífera (porosidad, permeabilidad, profundidad del nivel freático, etc.), y extrínsecas, como la climatología, características de las formaciones encajantes, etc

La afección será la situación de deterioro debida a la acción de sustancias o agresiones de otra índole.

Sin embargo con frecuencia se confunden ambos términos y se mezclan incluso con el de áreas de recarga o influencia, un ejemplo de notable trascendencia lo tenemos en la

Directiva Europea de Nitratos e incluso en su transposición a la legislación española, en las que se definen como zonas vulnerables áreas que sin duda deberían ser definidas como de recarga o de influencia: "Zonas vulnerables son todas las superficies conocidas del territorio cuya escorrentia fluya hacia las aguas afectadas por la contaminación y las que podrían verse afectadas si no se toman medidas oportunas, y que contribuyan a la contaminación".

En este trabajo se considerará la vulnerabilidad como sensibilidad, la afección como la situación de deterioro y el riesgo como la conjunción de vulnerabilidad y presencia de una actividad potencialmente contaminante.

#### **4. LOS MICROORGANISMOS COMO AGENTES CONTAMINANTES. ORIGEN**

**4.1. Aguas residuales urbanas**

**4.2. Ganadería**

**4.3. Agricultura**

**4.4. Vertederos de residuos sólidos**

**4.5. Aguas superficiales**

**4.6. Actividades industriales. Minería**

---

## 4.- LOS MICROORGANISMOS COMO AGENTES CONTAMINANTES. ORIGEN.

---

En condiciones naturales las aguas subterráneas contienen muy pocos microorganismos, debido a la escasez de nutrientes, al escaso o nulo aporte energético y al filtrado que sufre el agua al atravesar los materiales del acuífero. Generalmente no hay animales superiores, algas, protozoos ni hongos y la mayoría de las bacterias presentes no son patógenas.

Cuando la acción del hombre modifica el normal funcionamiento de los acuíferos, y sobre todo cuando introduce sustancias y formas de energía que son extrañas, puede provocar una proliferación anormal de microorganismos, o la presencia de microorganismos patógenos provenientes del exterior.

---

### 4.1.- AGUAS RESIDUALES URBANAS

---

La eliminación de las excretas y aguas domésticas mediante el sistema de alcantarillado representa sin duda una solución sanitariamente adecuada, pero ello no quiere decir que no conlleve problemas e inconvenientes.

Las aguas residuales urbanas están formadas por una mezcla de aguas domésticas de lavado, excretas y vertidos de las industrias existentes en la población.

Se trata pues de una mezcla compleja, rica en principios nutritivos de toda clase y en los más variados estados de degradación (grasas, ácidos grasos, proteínas, aminoácidos libres, hidratos de carbono, sales minerales, gases en disolución, metales pesados, plaguicidas, etc).

Esta variedad de nutrientes permite la proliferación en las aguas fecales de una gran variedad de especies bacterianas, hongos, protozoos, así como animales superiores como parásitos intestinales, mamíferos roedores, etc.

Particularmente, las aguas residuales contienen las excretas de personas enfermas, y por ello pueden servir de vehículo para la transmisión de un buen número de enfermedades como el cólera o la salmonelosis. Debido a esto las aguas residuales urbanas presentan un potencial de contaminación y riesgo muy grande en comparación con otras fuentes.

Las excretas humanas contienen una gran cantidad de bacterias. Además de las bacterias patógenas que provienen de personas enfermas, contienen bacterias oportunistas que forman parte de la flora intestinal normal pero pueden ser patógenas si son ingeridas por otra persona como es el caso de *Escherichia coli*. En la tabla 4.1 pueden verse los valores medios del número de bacterias de diferentes especies significativas en las heces humanas y animales.

En la red de alcantarillado las excretas se dividen en numerosas partículas de pequeño tamaño que permanecen en suspensión en el agua y son transportadas con ella. Dentro de estas partículas existen unas condiciones diferentes a las del medio

Tabla 4.1 - Aportes normales de las excretas del hombre y algunos animales.

BACTERIA	HOMBRE	BOVINO	OVINO
<i>Escherichia coli</i>	$1,3 \cdot 10^7$	$7,2 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^1$
<i>Enterococcus faecalis</i>	$8,1 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^6$
<i>Streptococcus bovis</i>	58	$3,8 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^6$
<i>Bifidobacterium</i>	$5,6 \cdot 10^9$	0	0
<i>Rhodococcus coprophilus</i>	0	$2,1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$
<i>Micromonospora</i>	0	$2,1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$
<i>Streptomyces</i>	$2,6 \cdot 10^3$	$9,1 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^4$

Fuente: Bitton (1983)

y que pueden ser favorables para la supervivencia de ciertas bacterias.

Esta contaminación puede alcanzar las aguas subterráneas por diversas vías, entre las que se pueden citar:

- Las fugas de las redes de alcantarillado, en poblaciones situadas sobre terreno permeable.
- Vertidos directos sobre el terreno.
- Vertidos en pozos negros.

Entre los microorganismos que pueden ser encontrados en estas aguas destacan:

\* Bacterias de la putrefacción: *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas*

*fluorescens*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis*, *Enterobacter cloacae*.

\* Indicadores fecales: *Escherichia coli*, *Enterococcus* s.p., *Clostridium* sulfitorreductores; entre los patógenos humanos: *Salmonella* s.p., *Shigella* s.p., *Mycobacterium* s.p., *Brucella* s.p., *Legionella* s.p., *Vibrio* s.p., *Clostridium* s.p., *Leptospira* s.p.

\* Abundan las bacterias sulforreductoras y sulfatooxidantes, produciéndose una importante cantidad de  $\text{SH}_2$  a partir de los sulfatos (*Desulfovibrio desulfuricans*). También abundan bacterias que oxidan el azufre como *Thiothrix* y *Beggiatoa*.

\* Se encuentran así mismo bacterias

desnitrificantes (*Thiobacillus desnitrificans*, *Micrococcus desnitrificans*) bacterias metanógenas y siderobacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*) Cuando las aguas contienen hidrocarburos se desarrollan especies capaces de degradarlos como *Pseudomonas* y *Nocardia*.

\* Debido a las favorables condiciones se desarrollan hongos y levaduras (*Leptomitus lacteus*, *Fusarium acueductum*, *Sacharomyces*, *Candida*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula*, etc.)

\* Además de bacterias se encuentran gran cantidad de virus y bacteriófagos; entre los primeros, destacan por su relevancia sanitaria los de la poliomielitis, Coxackie, Echo, hepatitis A, rotavirus, etc.

\* No pueden olvidarse gran cantidad de parásitos que se eliminan por heces (protozoos, gusanos intestinales y sus huevos)

---

## 4.2.- GANADERÍA

---

La actividad ganadera, supone un importante foco de contaminación, pues a dicha actividad han de sumarse ciertas prácticas agrícolas, especialmente el abonado con estiércol y purines.

La producción de heces por kilogramo de peso vivo es muy superior en los hervíboros que en el ser humano, y como consecuencia también se produce un mayor aporte de bacterias.

Como se vio en la tabla 4 1, la proporción de ciertas especies es diferente en las heces

humanas y animales. Incluso algunas especies son privativas de los seres humanos o de los animales, por lo que pueden emplearse como indicadores específicos de contaminación de procedencia humana o animal.

Si bien la contaminación producida por la ganadería es más importante que los residuos humanos en cuanto a volumen, no lo es así en cuanto a riesgo (patogeneidad), dado que muchos de los microorganismos patógenos son propios de una única especie.

No obstante, además de ciertos microorganismos que pueden ser transmitidos por animales, existen parásitos de transmisión hídrica que emplean animales domésticos o salvajes como hospedadores intermedios. Los huevos y larvas de gusanos pueden llegar a circular distancias apreciables en acuíferos kársticos y fisurados.

Es importante diferenciar las explotaciones ganaderas en dos grupos:

- **Explotaciones extensivas**, con el ganado disperso sobre un área de extensión grande y que por ello depositan sus deyecciones y orines de forma diseminada

- **Explotaciones intensivas**, estabuladas, cuyos excrementos se acumulan en el establo y luego son eliminados de una forma u otra.

En el primer caso, que se aproxima mucho a la situación natural, las heces y orines se desecan por acción del aire y del sol, eliminándose así la mayor parte de los microorganismos. Más tarde la acción de las bacterias de la putrefacción, larvas de

moscas y otros insectos, la lluvia y el sol terminan descomponiendo el residuo, llegándose a su total mineralización. En regiones áridas este proceso se produce antes de que las bacterias puedan acceder al acuífero.

Cuando el ganado está estabulado, los animales orinan sobre sus propias heces, formando una mezcla semilíquida que se deposita en grandes montones o se acumula en fosas impermeables. Los lixiviados de los montones de estiércol tienen un elevado riesgo de alcanzar las aguas subterráneas si están ubicados sobre terreno permeable. En el otro caso, al ser utilizados los purines como abono tienen una cierta probabilidad de infiltrar hacia las aguas subterráneas, al tener una fracción líquida importante. Otra fuente de contaminación la constituyen las aguas de lavado de las instalaciones, que con mucha frecuencia son vertidas directamente sobre el terreno.

---

#### 4.3.- AGRICULTURA

---

La actividad agrícola no introduce ningún tipo de contaminante microbiológico en el agua subterránea, si se exceptúa el empleo como abono de estiércol y purines incorrectamente tratados. Estos productos antes de ser aplicados deben sufrir un proceso de maduración que además de disponer los nutrientes de forma más accesible para las plantas elimina las bacterias patógenas que pudieran existir.

Otro proceso que puede implicar un gran impacto es el empleo de aguas residuales urbanas para el riego. Estas aguas, que pueden ser portadoras de todo tipo de

organismos patógenos, pueden acceder al acuífero, además de contaminar directamente los productos con ellas regados, lo que supone un gran riesgo si van a ser consumidos crudos

Por último cabe citar una práctica forestal que es la depuración de aguas residuales mediante el riego de choperas (sistema denominado "filtro verde", que será descrito entre las técnicas de depuración). En estos casos resulta evidente la necesidad de hacer un estudio previo para localizar la mejor ubicación del filtro y la correcta ejecución y mantenimiento del mismo

---

#### 4.4.- VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

---

Los lixiviados producidos en los vertederos de residuos sólidos poseen una concentración muy elevada en compuestos nitrogenados, grasas y sales minerales, lo cual constituye un medio de cultivo adecuado para muchas bacterias y hongos. Al filtrarse este lixiviado hasta alcanzar las aguas subterráneas modifica radicalmente la naturaleza oligotrófica de estas, por lo que aguas que difícilmente serían capaces de mantener una mínima población bacteriana se convierten en perfectos caldos de cultivo

El desarrollo de estas bacterias consume rápidamente el oxígeno disuelto en el agua creándose un medio anaerobio. Todos estos procesos confieren a las aguas colores extraños y olores y sabores repugnantes además de productos tóxicos que las hacen inadecuadas para el consumo.

El remedio para estos problemas está en la correcta ubicación de los vertederos, alejados de zonas permeables, correctamente aislados e impermeabilizados

---

#### 4.5.- AGUAS SUPERFICIALES

---

Las aguas superficiales están expuestas a todo tipo de agresión contaminante, además de haber sido ampliamente empleadas como medio para diluir y dispersar residuos de todo tipo. Si este agua se infiltra arrastra consigo los residuos, incorporándolos al acuífero.

El grado en que esta contaminación llega a las aguas subterráneas depende del tipo y espesor de los materiales que debe atravesar. Desgraciadamente, la mayor parte del agua infiltra a través de los horizontes más permeables, donde la filtración es menor.

El riesgo de contaminación microbiológica producida por infiltración de aguas superficiales depende de los vertidos urbanos, industriales o agrícolas al río más que de la población microbiana natural de éste.

---

#### 4.6.- ACTIVIDADES INDUSTRIALES. MINERÍA

---

La minería emplea microorganismos en los procesos de enriquecimiento de ciertas menas (minerales de cobre, cinc y uranio

entre otros) y en la recuperación de sus escombreras. Se emplean normalmente bacterias acidófilas quimioautótrofas tales como *Thiobacillus ferrooxidans* y *T. thiooxidans*. Estas bacterias oxidan el mineral (sulfuros insolubles en agua) a sulfatos solubles, que son recuperados del agua de lixiviado. El pH óptimo de crecimiento de estas bacterias se encuentra entre 2 y 4 pero presentan crecimiento incluso a pH tan bajo como 1. Las aguas de minas metálicas están contaminadas frecuentemente con este tipo de microorganismos, lo que presenta ciertos inconvenientes y en especial la disminución del pH. La minería sin embargo raramente será un foco de contaminación microbiológica, dado que las bacterias que se utilizan no son patógenas.

En muchas industrias se utilizan bacterias, levaduras u hongos filamentosos en los procesos productivos; baste citar como ejemplo:

- Industrias lácteas (cuajada, yogur, queso, mantequilla, etc).
- Industria panadera
- Bebidas alcohólicas (cerveza, vino, sidra), vinagres.
- Industria química (ácido cítrico, láctico, enzimas, aminoácidos, etc.).
- Industria farmacéutica (antibióticos, esteroides, etc.).

Salvo la industria farmacéutica, que en ocasiones emplea microorganismos potencialmente patógenos, el resto no constituye un peligro desde este punto de vista.



Sin embargo, revisten especial peligrosidad algunas industrias que vierten medios ricos en nutrientes que permiten un desarrollo bacteriano intenso. Entre ellas cabe citar:

- Mataderos
- Alcohólicas y almazaras
- Industrias de la alimentación en general.
- Celulósicas.
- Industria petroquímica.

Los microorganismos presentes en los vertidos de este tipo de industrias son muy variados, desde hongos (*Sacharomyces*, *Candida*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula*, muy abundantes en vertidos de industrias de la bebida o en las lejías de la industria de la celulosa), bacterias envainadas como *Sphaerotilus natans* (en vertidos de fábricas de productos alimenticios o celulosas) Cuando las aguas proceden de mataderos pueden contener microorganismos patógenos (*Bacillus*, *Clostridium*, etc), y si en el agua hay excrementos son muy

abundantes *Mixobacterias*, *Cystobacter* y *Polyangium*.

Muchas industrias sufren deterioro de sus instalaciones o productos por la acción de microorganismos, lo que puede suponer cuantiosas pérdidas económicas. Por ejemplo las aguas ácidas producidas por *Thiobacillus* atacan al hierro e incluso al hormigón, bacterias como *Desulfovibrio* que producen  $\text{SH}_2$  causan una rápida corrosión del hierro. La madera es atacada por hongos que metabolizan la celulosa y lignina (ascomicetos), también por bacterias (*Cytophaga*, *Sporocytophaga*). La goma se ve atacada por *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Nocardia*, *Micromonospora*.

## **5. IMPORTANCIA HIDROGEOQUÍMICA DE LOS MICROORGANISMOS**

**5.1. Carbono**

**5.2. Nitrógeno**

**5.3. Fósforo**

**5.4. Azufre**

## 5.- IMPORTANCIA HIDROGEOQUIMICA DE LOS MICROORGANISMOS

Los microorganismos capaces de vivir en los acuíferos intervienen en diversos de los procesos químicos que allí ocurren.

oxidación-reducción (redox), que afectan fundamentalmente a los compuestos de nitrógeno, azufre y carbono, así como al hierro y en menor medida a otros oligoelementos

Las bacterias aerobias utilizan el oxígeno para su metabolismo, mientras que las anaerobias utilizan sulfatos, anhídrido carbónico, nitratos o compuestos orgánicos. Entre los microorganismos presentes en los acuíferos se incluyen bacterias sulfato-reductoras,

Tabla 5.1 - Procesos de oxidación de materia inorgánica que consumen oxígeno disuelto en el agua subterránea.

PROCESO	REACCIÓN
Oxidación de sulfuros.	$O_2 + \frac{1}{2} HS^- \rightleftharpoons \frac{1}{2} SO_4^{2-} + \frac{1}{2} H^+$
Oxidación de hierro.	$\frac{1}{4} O_2 + Fe^{2+} + H^+ \rightleftharpoons Fe^{3+} + \frac{1}{2} H_2O$
Nitrificación.	$O_2 + \frac{1}{2} NH_4^+ \rightleftharpoons \frac{1}{2} NO_3^- + H^+ + \frac{1}{2} H_2O$
Oxidación de manganeso.	$O_2 + 2Mn^{2+} + 2 H_2O \rightleftharpoons 2MnO_2(s) + 4 H^+$
Oxidación de sulfuro de hierro	$3\frac{1}{4} O_2 + FeS_2(s) + 3 \frac{1}{2} H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3(s) + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

Freeze y Cherry 1979.

El fundamento de esta participación es la necesidad de asimilar para sus funciones vitales determinados elementos presentes en el acuífero, produciendo una serie de transformaciones que originan nuevos compuestos. Además, los productos del metabolismo bacteriano ( $SH_2$ ,  $CO_2$ , ácidos orgánicos) son muy agresivos para el medio.

Los principales procesos en los que intervienen los microorganismos son los de

desnitrificantes, metanogénicas y oxidantes de sulfuros e hidrocarburos. Las tablas 5.1 y 5.2 resumen los principales procesos redox en el agua subterránea que consumen oxígeno y materia orgánica y en los que participan bacterias.

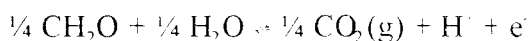
Tabla 5.2.- Procesos de redox que consumen materia orgánica y reducen compuestos inorgánicos en el agua subterránea. Freeze y Cherry 1979.

PROCESO	REACCIÓN
Desnitrificación.	$CH_2O + 4/5 NO_3^- \rightleftharpoons 2/5 N_2(g) + HCO_3^- + 1/5 H^+ + 2/5 H_2O$
Reducción de manganeso (IV)	$CH_2O + 2 MnO_2(s) + 3H^+ \rightleftharpoons 2Mn^{2+} + HCO_3^- + 2H_2O$
Reducción de hierro (III).	$CH_2O + 4 Fe(OH)_3 (s) + 7 H^+ \rightleftharpoons 4 Fe^{2+} + HCO_3^- + 10 H_2O$
Reducción de sulfato.	$CH_2O + 1/2 SO_4^{2-} \rightleftharpoons 1/2 HS^- + HCO_3^- + 1/2 H^+$
Formación de metano.	$CH_2O + 1/2 H_2O \rightleftharpoons 1/2 CH_4 + 1/2 HCO_3^- + 1/2 H^+$

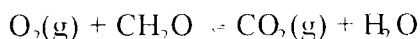
### 5.1.- CARBONO

El carbono orgánico presente en el agua subterránea puede sufrir procesos de oxidación, catalizados por bacterias o enzimas aislados, que obtienen así energía para sus funciones metabólicas.

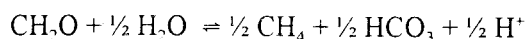
Los compuestos orgánicos que pueden aparecer en el agua son numerosos: polisacáridos, ácidos grasos, aminoácidos, fenóles. Considerando un hidrocarburo sencillo, la oxidación que ocurre es:



El proceso completo en presencia de bacterias y oxígeno molecular libre es



En condiciones extremadamente reductoras la materia orgánica puede, en presencia de bacterias, sufrir degradaciones anaeróbicas productoras de metano



La formación de metano se produce a Eh de -240 mV (pH= 7 y T= 25 °C).

### 5.2.- NITRÓGENO

La forma más estable de nitrógeno en el agua subterránea en las condiciones normales (medio francamente aerobio) es la nítrica (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). El nitrógeno llega a las aguas subterráneas procedente de las transformaciones naturales que se producen en el suelo o por aportes externos (vertidos, fertilizantes), y puede encontrarse bajo diferentes formas iónicas o moleculares. Su asimilación por los microorganismos precisa la transformación en otras formas.

Los procesos más habituales en el agua subterránea en condiciones aerobias son la formación de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (amonificación) y su transformación a nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (nitrificación). En condiciones anaerobias el proceso más

Figura 5.1.- Esquema de las transformaciones del nitrógeno.

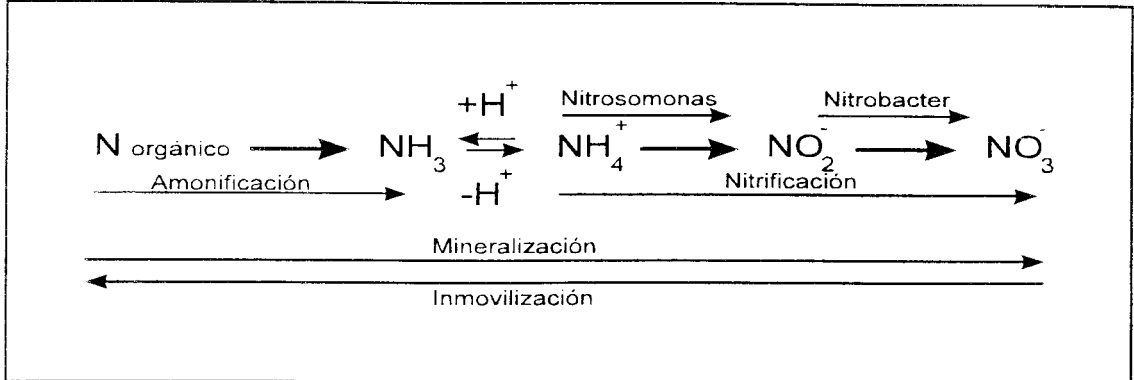
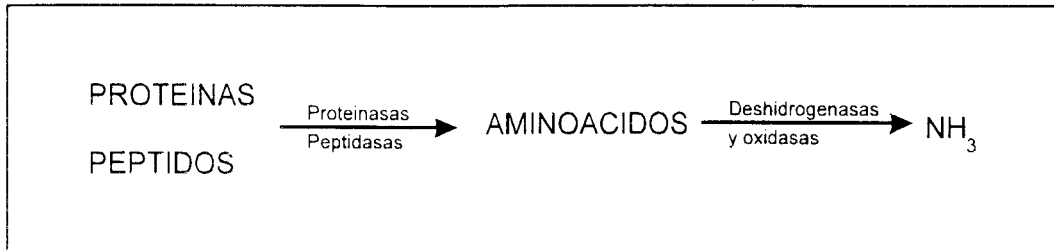


Figura 5.2.- Secuencia de amonificación de aminoácidos y proteínas.



habitual es la desnitrificación del nitrato a  $\text{N}_2$ .

### AMONIFICACION

Es un proceso enzimático por el que el nitrógeno orgánico se transforma en

amoniaco ( $\text{NH}_3$ ). El sustrato inicial es normalmente una macromolécula (proteína, ácido nucleico) que se transforma en otros compuestos orgánicos más sencillos (aminoácidos, aminoazúcares) y posteriormente en  $\text{NH}_3$ , en presencia de enzimas. Los esquemas siguientes muestran

Figura 5.3.- Secuencia de amonificación de los ácidos nucleicos.

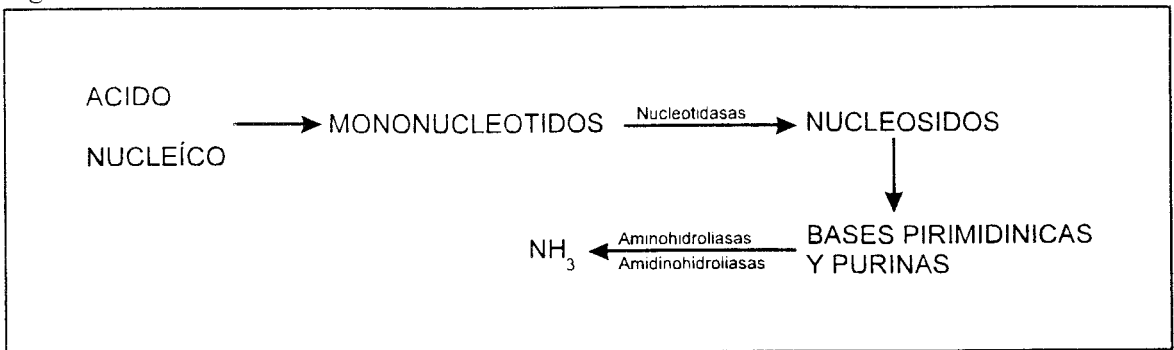
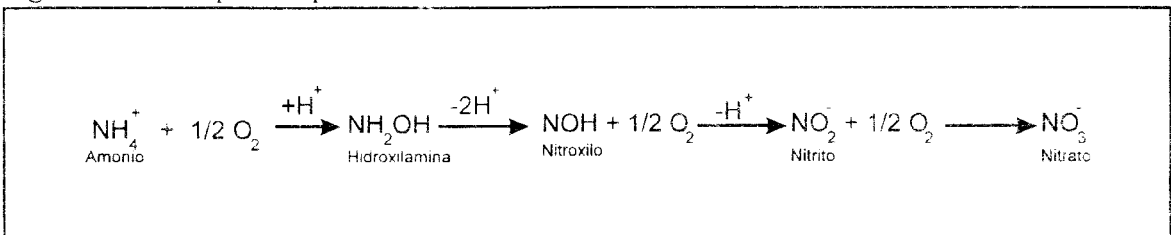


Tabla 5.3.- Bacterias nitrificantes quimioautótrofas.

GENERO	ESPECIES	HÁBITAT
Oxidación NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> a NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .		
Nitrosomonas	europaea	suelo, agua y vertidos
Nitrospira	briensis	suelo
Nitrosococcus	nitrosus	marino, suelo
	oceanus	marino
Nitrosolobus	mobilis	marino
Nitrosovibrio	multiformis	suelo
	tenuis	suelo
Oxidación NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> a NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :		
Nitrobacter	winogradskyi	suelo
Nitrospira	gracilis	suelo, agua
Nitrospira	marina	marino
Nitrococcus	mobilis	marino.

Fuente : (Stevenson, F.J. (1986)

Figura 5.4.- Etapas del proceso de nitrificación.



las transformaciones de algunos compuestos orgánicos

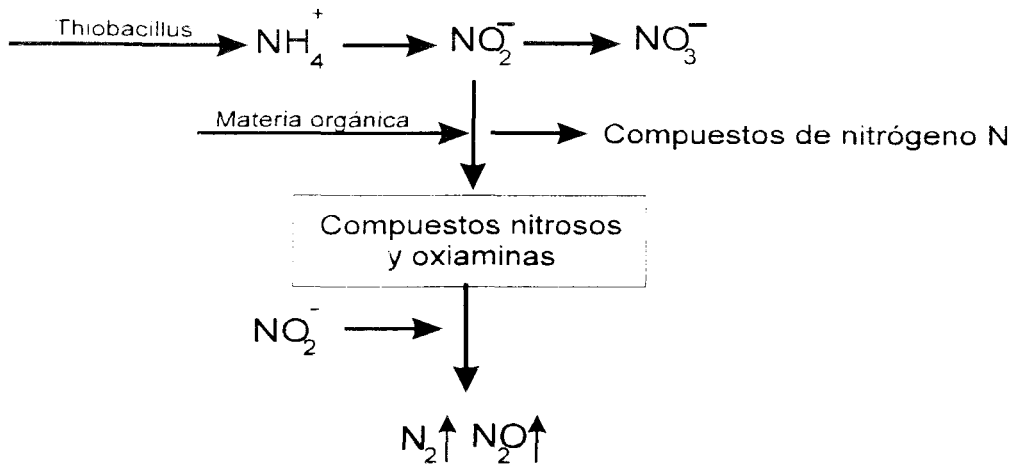
**NITRIFICACION:**

Es el proceso de oxidación del amoníaco formado en la fase anterior a nitrato. La transformación se realiza en dos etapas y en presencia de bacterias nitrificantes que utilizan la energía producida en las

reacciones para su metabolismo:

Los microorganismos implicados pertenecen a la familia de nitrobacterias autótrofas. Las especies presentes en las aguas dulces son *Nitrosomonas europaea* y *Nitrobacter winogradskyi*. Otras especies de esta familia viven en el suelo, aguas salinas y vertidos

Figura 5.5 - Quimiodesnitrificación



La oxidación de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$  parece realizarse en dos pasos, con formación de productos intermedios y con un desprendimiento de energía de 65 Kcal/mol. El paso de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$  no parece producir compuestos intermedios, generando esta oxidación una energía de 17,8 Kcal/mol.

Entre los factores que afectan al proceso de nitrificación destacan la temperatura, pH y los sustratos presentes en el agua ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ). A temperaturas inferiores a 5 °C la producción de  $\text{NO}_3^-$  está muy limitada.

En condiciones normales, la oxidación de  $\text{NO}_2^-$  es un proceso muy rápido por lo que esta especie suele estar presente en concentraciones traza.

Ciertos metabolitos y compuestos orgánicos, presentes en el agua procedentes del suelo o de vertidos, son tóxicos para las

bacterias, inhibiendo determinadas etapas en las transformaciones de los compuestos de nitrógeno.

#### DESNITRIFICACION:

En condiciones anaerobias el nitrógeno en forma nítrica puede transformarse a las especies reducidas y escapar en forma gaseosa a la atmósfera.

La desnitrificación puede ser:

- Bacteriana: a partir de microorganismos desnitrificantes.
- Química: a partir del  $\text{NO}_2^-$ , por inhibición del segundo paso de la nitrificación.

En ausencia de oxígeno, determinados organismos son capaces de utilizar el oxígeno del nitrato y nitrito para su metabolismo, convirtiendo las especies de

Tabla 5.4.- Bacterias desnitrificantes mas comunes.

GÉNERO	OBSERVACIONES
Alcaligenes	Frecuente en suelos
Agrobacterium	Frecuente en suelos
Azospirillum	Capaz de fijar el nitrógeno, comunmente asociado a cesped.
Bacillus	Desnitrificante termofilo
Flavobacterium	Recientemente aislado
Halobacterium	Requiere altas concentraciones salinas
Hyphomicrobium	Vive sobre sustratos monocarbonados
Paracoccus	Crece en condiciones litotróficas y heterótrofas
Propionibacterium	Produce fermentaciones
Pseudomonas	Frecuente en suelos
Rhodopseudomonas	Bacterias fotosintéticas
Thiobacillus	Generalmente quimiautótrofas

Fuente :Stevenson F.J. (1986)

nitrógeno en  $N_2$  y  $N_2O$ .

La desnitrificación precisa que se cumplan ciertas condiciones:

- Presencia de bacterias desnitrificantes.
- Presencia de dadores de electrones (materia orgánica, compuestos de azufre reducido, hidrógeno molecular).
- Condiciones anaerobias.
- Suministro de  $NO_2^-$  y  $NO$  como aceptores de electrones.

La tabla 5.4 muestra las bacterias desnitrificantes más comunes. Los microorganismos implicados principalmente son heterótrofos y pertenecen a los géneros *Alcaligenes*, *Agrobacterium*, *Bacillus* y *Pseudomonas*. Otros secundarios son autótrofos (*Thiobacillus*).

La desnitrificación bacteriana ocurre en una serie de etapas:



Algunas bacterias no son capaces de reducir el gas  $N_2O$  a  $N_2$ , y el óxido de nitrógeno escapa como tal a la atmósfera.

El primer paso del proceso de desnitrificación ( $NO_3^- \rightarrow NO$ ) está catalizado por la enzima nitratorreductasa.

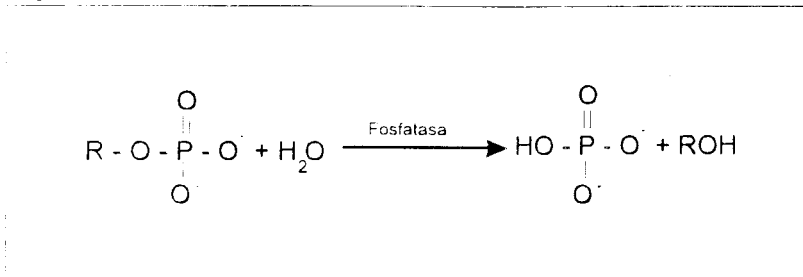
En la reducción de  $NO_2^-$  a  $NO$  intervienen dos tipos de enzimas: citocromo Cd y una proteína de Cu.

Las condiciones adecuadas para que se produzca la desnitrificación bacteriana son:

- Temperaturas superiores a 25 °C. Por debajo de 2 °C cesa la actividad.



Figura 5.6.- Acción del enzima fosfatasa.



- pH neutros

-Aporte de materia orgánica descomponible.

En determinadas condiciones la presencia de compuestos tóxicos para *Nitrobacter* inhibe el paso de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$ , produciendo concentraciones elevadas de  $\text{NO}_2^-$ , que por procesos de quimiodesnitrificación puede pasar a las fases gaseosas. Estas reacciones se ven favorecidas a pH bajos. La figura 5.5 esquematiza este proceso.

---

### 5.3.- FÓSFORO

---

El fósforo no suele aparecer en el agua subterránea en contenidos altos, debido a su gran tendencia a formar complejos insolubles con cationes di- y trivalentes y ser adsorbido por los coloides del suelo

Las plantas extraen el fósforo del suelo por solubilización de los minerales, con la intervención de microorganismos, en función de sus necesidades, por lo que no se producen cantidades importantes de excedentes solubles en el agua que se infiltra

La intervención de microorganismos en el ciclo del fósforo ocurre en tres sentidos:

- Descomposición de compuestos orgánicos de P, con formación de fosfatos inorgánicos

- Inmovilización de fosfatos en el material celular de las plantas

- Solubilización del fósforo mineral

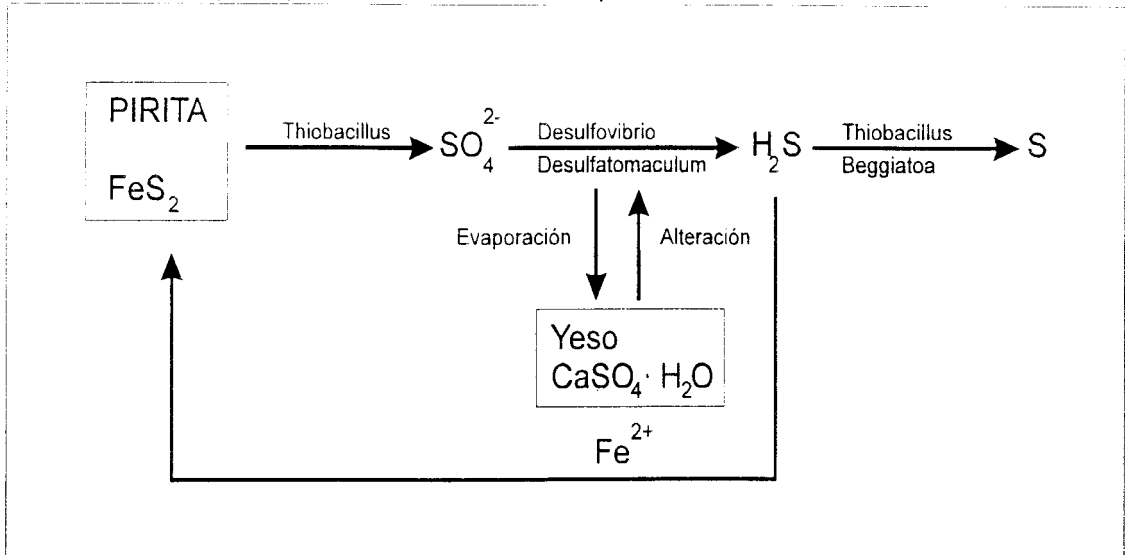
En el paso final de la conversión de P orgánico a fosfatos inorgánicos en los suelos intervienen enzimas fosfatasas. En los suelos existen dos tipos principales:

- Fosfatasas ácidas, cuya actividad óptima ocurre a pH de 4 a 6.

- Fosfatasas alcalinas, cuyo pH óptimo es de 9 a 11.

Los fosfatos insolubles de Fe, Al y Ca pueden liberarse a formas solubles por acción de ácidos orgánicos y quelatos producidos en la descomposición de la materia orgánica, en la que intervienen microorganismos, y los productos excretados por las raíces de las plantas.

Figura 5.7.- Principales procesos redox de los compuestos del azufre.



#### 5.4.- AZUFRE

El azufre contenido en el suelo procede principalmente de la pirita (FeS<sub>2</sub>) presente en las rocas ígneas. La alteración de estos materiales oxida la pirita a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, que es incorporado a la materia orgánica del suelo y asimilado por microorganismos y plantas. En zonas áridas se produce la precipitación del azufre como yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) y epsomita (MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O). El agua que percola a través del suelo disuelve los sulfatos y los transporta hacia los acuíferos.

Además del importante proceso de asimilación del azufre por los microorganismos, como elemento fundamental para su metabolismo, los compuestos orgánicos de azufre están sujetos a una serie de fenómenos de

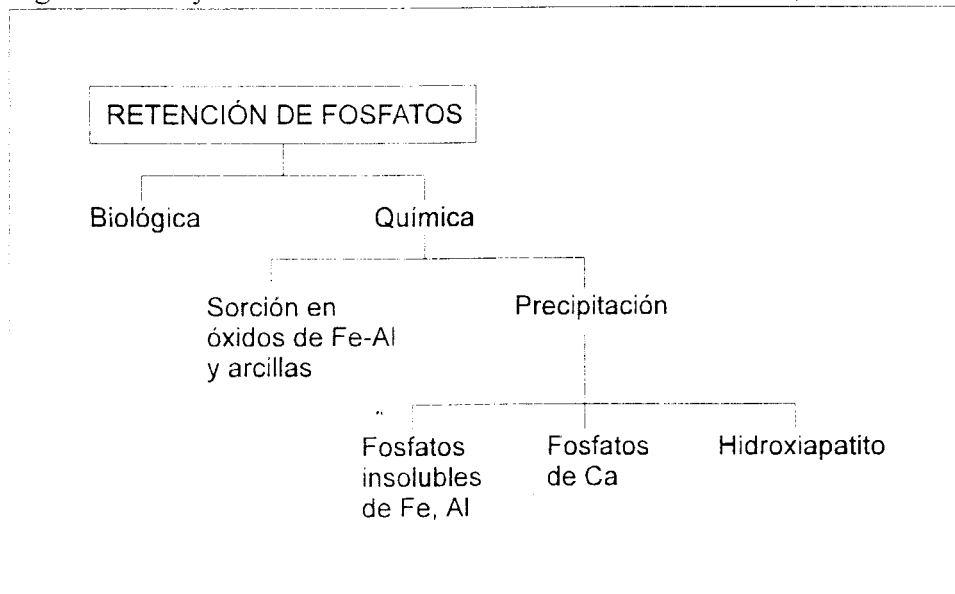
oxidación-reducción, en la mayoría de los cuales intervienen microorganismos.

Los microorganismos implicados en la oxidación del azufre presentes en el suelo son del género *Thiobacillus*. En el medio acuático destacan las bacterias *Beggiatoa* y *Thiotrix* y las bacterias fotosintéticas *Thiospirillum* y *Thiocystis*.

En el género *Thiobacillus* destacan: *T. thiooxidans* y *T. ferrooxidans*, responsables de los procesos bacterianos que afectan a los sulfuros y sulfatos de hierro. Ambos microorganismos se desarrollan en ambientes muy ácidos (pH 2,0 a 3,5). Algunas de las reacciones en las que intervienen estas bacterias se muestran en la figura 5.9.

La reducción de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mediante microorganismos se produce por dos mecanismos:

Figura 5.8. - Fijación de fosfatos en el suelo. (Stevenson F.J. 1986)



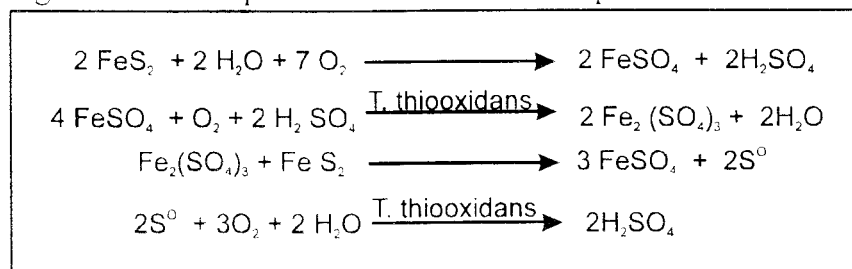
- Inmovilización por asimilación del azufre en las células de los microorganismos.
- Reducción respiratoria, en medios anaerobios, que libera H<sub>2</sub>S.

sulfuros metálicos, en especial de Fe<sup>2+</sup>. Producen alteración de las aguas naturales; su presencia se manifiesta por coloraciones negras y olor a sulfhídrico.

Las bacterias anaerobias capaces de reducir SO<sub>4</sub><sup>-</sup> a H<sub>2</sub>S pertenecen a dos géneros: *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*. El SO<sub>4</sub> es utilizado por estos microorganismos en sustitución del O<sub>2</sub>, para metabolizar el carbono.

Los mecanismos sulfatorreductores juegan un importante papel en la precipitación de

Figura 5.9.- Principales reacciones de los compuestos de azufre.



## **6. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**6.1. *Introducción, microorganismos indicadores de contaminación***

**6.2. *Criterios de calidad microbiológica***

---

## 6.- CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

---

---

### 6.1.- INTRODUCCIÓN. MICROORGANISMOS INDICADORES DE CONTAMINACIÓN

---

Como se ha visto en capítulos precedentes, las aguas subterráneas no son en modo alguno invulnerables a la contaminación microbiológica. De hecho, los acuíferos libres (con materiales permeables sobre el nivel freático) y en especial los kársticos y fisurados, presentan una gran vulnerabilidad. Incluso acuíferos aislados por formaciones impermeables, que estarían protegidos de forma natural, dejan de estarlo cuando la incorrecta ejecución de sondeos los pone en comunicación con niveles de peor calidad o con el exterior.

Como la separación e identificación de todos los microorganismos de una muestra sería un proceso muy largo y costoso, se eligen unos "indicadores" que permiten la determinación rápida y fiable de la existencia de contaminación, para luego realizar un estudio de detalle si se precisa.

A continuación se resumen los principales microorganismos patógenos humanos que se pueden encontrar en un entorno hídrico.

#### VIRUS:

Virus de la Poliomiéлитis, poliovirus.  
*Coxsackie* A y B.  
*Echovirus*

#### *Hepatitis A y E.*

Reovirus humanos  
Rotavirus humanos  
Adenovirus humanos  
Agente de Norwalk  
*Parvovirus*

#### BACTERIAS:

*Escherichia coli* (algunos serotipos)  
*Staphylococcus s.p.* (Entre ellos *S. aureus*)  
*Vibrio s.p.*  
*Clostridium s.p.* (*C. perfringens*, *C. tetani*,  
*C. botulinum*)  
*Campylobacter s.p.* (*C. jejuni*)  
*Leptospira s.p.* (*L. icterohaemorrhagiae*)  
*Pseudomonas s.p.* (*P. aeruginosa*)  
Listeria (*L. monocytogenes*)  
*Salmonella s.p.*  
*Shigella s.p.*  
*Yersinia s.p.* (*Y. enterocolitica*)  
*Mycobacterium s.p.*  
*Brucella s.p.*  
*Legionella s.p.*  
*Bacillus anthracis*

#### PROTOZOOS:

*Entamoeba histolytica*  
*Giardia intestinalis*  
*Balantium coli*

#### HELMINTOS

*Taenia saginata*  
*Trichiuris trichiura*  
*Ancylostoma duodenale*  
*Schistosoma s.p.*  
*Dhyphylobotrium latum*  
*Strongyloides stercoralis*  
*Ascaris lumbricoides*  
*Enterobius vermicularis*  
*Necator americanus*  
*Hymenolepis nana*  
*Fasciola hepática*

## MOHOS Y LEVADURAS:

*Candida albicans*

*Aspergillus s.p. (Aspergillus fumigatus)*

Las características que debe cumplir un microorganismo para ser empleado como indicador de contaminación son:

- No debe ser un poblador natural de las aguas en estudio

- Debe ser específico del proceso contaminante, por ejemplo, si se está estudiando la contaminación de un acuífero por el vertido de aguas residuales urbanas en un río (que recarga al acuífero) sería adecuado estudiar la presencia de *E. coli*, que procedería con seguridad del vertido

- La pervivencia del indicador en el agua ha de ser suficiente para que en el intervalo entre el vertido y el muestreo aún quede una cantidad representativa.

- No deberían poder multiplicarse en las condiciones del acuífero, pues ello falsearía los resultados

- La técnica de análisis ha de ser sencilla, poco costosa y lo más específica posible. Conviene emplear, cuando ello es posible, métodos oficiales o métodos estándar a fin de garantizar la reproductibilidad del ensayo.

En vista de lo anteriormente expuesto, un análisis bacteriológico rutinario incluye:

- Recuento total de bacterias aerobias

- Coliformes totales

- Coliformes fecales (*E. coli*)

- Estreptococos fecales (del grupo D)

- Esporas de *Clostridium* sulfito reductores.

- Otras determinaciones específicas cuando se sospeche algún problema concreto.

- Cuando se disponga de las técnicas adecuadas conviene determinar la presencia de virus (enterovirus, adenovirus, reovirus).

La determinación de coliformes totales indica de forma muy inespecífica la existencia de contaminación. Los coliformes son un grupo muy heterogéneo de bacterias que agrupa a bacilos Gram negativos fermentativos, como *E. coli*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Edwardsella*, *Citobacter*, etc. cuya procedencia puede ser fecal (se encuentran en el intestino del hombre y de los animales), pero también pueden proceder del suelo, polvo y agua. Por ello cuando se precisa determinar si la contaminación tiene origen fecal se recurre a los coliformes fecales, y más comúnmente a *E. coli*. Su presencia en el agua indica contaminación reciente, pero no ha de estar necesariamente ligada con organismos patógenos.

Los estreptococos fecales del grupo D proceden del intestino del hombre y de los animales. Estos organismos son un buen indicador al estar siempre ligados con las heces, empleándose como índice de desinfección. Son más resistentes a las condiciones ambientales, tratamiento térmico y agentes desinfectantes que *E. coli*.

Los *Clostridium* sulfitorreductores son bacilos esporulados anaerobios (aunque

algunos pueden crecer en condiciones microaerófilas) encontrando como hábitat natural el suelo y el intestino del hombre y animales. Aunque la mayor parte son saprofitas del suelo, algunos (*C. botulinum*, *C. tetani*, *C. perfringens*) pueden causar graves enfermedades en el hombre. La capacidad de producir esporas les confiere una gran resistencia a las condiciones ambientales adversas, por lo que mucho después de que los microorganismos viables hayan desaparecido aun se encuentran esporas viables en el agua contaminada. Se pueden descubrir así procesos contaminantes antiguos o deficiencias en el tratamiento de las aguas.

Los indicadores citados son los comúnmente empleados al estar recogidos en la legislación, pues están ligados a la actividad humana que supone la fuente de riesgo, mas importante (desde un punto de vista microbiológico), no obstante, existen otras muchas actividades que producen vertidos con carga microbiana (industria alimentaria, papelera, conservera maderas, ganado, etc.) cuyos vertidos aportan un sustrato adecuado para el desarrollo bacteriano, si bien este tipo de contaminación no contiene en muchas ocasiones microorganismos patógenos representan una importante agresión al medio.

En el capítulo 4 se han descrito contaminantes microbianos frecuentes en actividades diferentes a la contaminación humana, muchos de ellos pueden ser empleados como indicadores, destacan:

Bacterias de la putrefacción como *P. aeruginosa*, *Proteus vulgaris*, etc

Bacterias de ambientes especiales

*Desulfovibrio desulfuricans*, *Thiobacillus ferrooxidans*, etc

Otras bacterias como *Sphaerotilus natans*.

Hongos como *Aspergillus*, *Fusarium*, etc.

---

## 6.2.- CRITERIOS DE CALIDAD MICROBIOLÓGICA

---

Se resumen en este capítulo los criterios de calidad microbiológica que la legislación actual impone sobre las aguas de consumo.

### A) AGUAS POTABLES DE CONSUMO PÚBLICO

La reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables de consumo público, RD 1138/1990 de 14 de septiembre (BOE de 20 de septiembre) determina:

El número máximo de microorganismos incubados a 37°C y a 22°C (tabla 6 2)

Las aguas potables de consumo público no deberán contener organismos patógenos ni indicadores de contaminación fecal (tabla 6.1).

A fin de completar, dado que es necesario, el examen microbiológico de las aguas potables de consumo público, conviene buscar además de los microorganismos anteriormente citados, los microorganismos patógenos y en particular:

- Las salmonellas
- Los estafilococos patógenos
- Los bacteriófagos fecales

Tabla 6.1 Nivel admitido de microorganismos en aguas para consumo público.

PARÁMETROS	VOLUMEN DE MUESTRA (ml)	NIVEL GUÍA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE	
			MÉTODO DE MEMBRANA FILTRANTE	MÉTODO DE TUBOS MÚLTIPLES (nmp)
Coliformes totales	100	--	0 (*)	NMP<1 (*)
Coliformes fecales	100	--	0	NMP<1
Estreptococos fecales	100	--	0	NMP<1
Clostridium sulfito reductores	20	--	--	NMP<=1

(\*) Este valor en la red de distribución podrá ser rebasado en un 5% de las muestras como máximo, siempre que ninguna contenga más de 10 bacterias coliformes por 100 ml de agua y que en ningún caso se encuentren bacterias coliformes en dos muestras consecutivas.

- Los enterovirus

Por otro lado las aguas no deben contener

- Ni organismos parásitos
- Ni algas
- Ni otros elementos figurados (animáculos)

#### B) AGUAS DE BEBIDA ENVASADAS

En el RD 1164/1991 de 22 de julio se recoge la reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas.

En esta reglamentación se define lo que se entiende como microbismo normal del agua: *es la flora bacteriana perceptiblemente constante, existente en el manantial con anterioridad a cualquier*

*manipulación del mismo y cuya composición cualitativa y cuantitativa, tenida en cuenta para el reconocimiento de dicha agua, sea controlada periódicamente mediante los análisis pertinentes.*

#### B-1) Aguas minerales naturales:

En los puntos de alumbramiento, el contenido total de microorganismos revivificables de un agua mineral natural deberá ajustarse a su microbismo normal y manifestar una protección eficaz del manantial contra toda contaminación. A título orientativo, el contenido total de microorganismos revivificables no debería normalmente superar, respectivamente, 20 colonias por mililitro después de incubación a 20 - 22 °C durante setenta y dos horas y cinco colonias por mililitro después de incubación a 37 °C durante veinticuatro



Tabla 6.2.- Concentración máxima de microorganismos en aguas potables.

PARÁMETROS	T° INCUBACIÓN	RESULTADOS VOLUMEN DE MUESTRA (ml)	NIVEL GUÍA	CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE
Recuento de los gérmenes totales en las aguas destinadas al consumo	37 °C	1	10 (1) (2)	--
	22 °C	1	100 (1) (2)	--
Recuento de los gérmenes totales para las aguas acondicionadas	37 °C	1	5	20
	22 °C	1	20	100
(1) Para las aguas desinfectadas, los valores correspondientes habrán de ser netamente inferiores a la salida de la estación de tratamiento (2) Toda extralimitación de estos valores que persista durante sucesivas extracciones de muestras, habrá de estar sujeto a comprobación.				

horas.

Tras el envasado, dicho contenido no podrá pasar de 100 colonias por mililitro después de incubación a 20 - 22 °C durante setenta y dos horas en placas de agar o de mezcla agar-gelatina, y de 20 por mililitro después de incubación a 37 °C durante veinticuatro horas en placas de agar. El recuento deberá efectuarse en las doce horas siguientes al envasado; durante este tiempo, el agua deberá mantenerse a una temperatura entre 4 °C y 1 °C.

Tanto en los puntos de alumbramiento como durante su comercialización, un agua mineral natural deberá estar exenta de:

- a) Parásitos y microorganismos patógenos
- b) *Escherichia coli* y otros coliformes, y de estreptococos fecales, en 250 mililitros de la muestra examinada.

c) Clostridios sulfitorreductores, en 50 mililitros de la muestra examinada

d) *Pseudomonas aeruginosa*, en 250 mililitros de la muestra examinada

Sin perjuicio de lo establecido en los anteriores apartados, el contenido total de microorganismos revivificables del agua mineral natural sólo podrá resultar de la evolución normal del contenido en gérmenes que tuviera en los puntos de alumbramiento

#### B-2) Aguas de manantial:

Cumplirán los criterios fijados para las aguas minerales naturales en el apartado B-1.

#### B-3) Aguas preparadas:

En los puntos de alumbramiento, deberán

cumplir los requisitos establecidos para las aguas destinadas a la producción de agua potable de consumo público, antes de efectuarse tratamientos, de acuerdo con lo establecido en la Orden de 11 de mayo de 1988, sobre características básicas de calidad que deben ser mantenidas en corrientes de agua superficiales cuando sean destinadas a la producción de aguas potables (BOE del 24).

Efectuada la preparación, cumplirán las exigencias establecidas para las aguas minerales naturales en el apartado B-1.

*B-4) Aguas de consumo público envasadas:*

En todas sus especificaciones deberán ajustarse, al menos, a lo establecido para las aguas potables de consumo público en la vigente Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público, aprobada por el Real Decreto 1138/1990, de 14 de septiembre.

## **7. MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS**

**7.1. Elección de los puntos de muestreo**

**7.2. Equipos de muestreo**

**7.3. Muestreo y conservación de las muestras**

**7.4. Fundamentos de los análisis microbiológicos**

---

## 7.- MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

---

El muestreo para análisis microbiológicos requiere unas técnicas y precauciones diferentes que el muestreo para análisis químicos.

En este capítulo se describirán las diferentes técnicas de muestreo y se destacarán las diferencias con el muestreo para análisis químicos.

El ITGE ha publicado una guía titulada "Guía operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de aguas subterráneas destinadas al análisis químico y bacteriológico" en la que se trata el tema abordado en este capítulo con mas profundidad

---

### 7.1.- ELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

---

En un pozo de agua, especialmente si no se bombea agua con regularidad, puede haber una flora bacteriana muy diferente a la existente en el acuífero. A modo de ejemplo citaremos algunas posibles causas:

- Las diferentes condiciones de oxigenación
- La posible decantación de partículas de materia orgánica.

- La contaminación por la boca del pozo, debido a:

\* Vertidos intencionados

\* Excrementos de aves que se posan en el brocal.

\* Drenaje del terreno hacia el pozo.

\* Pérdidas de aceite o gas-oil del grupo motobomba.

- En pozos excavados abiertos, en los que el agua está expuesta a la luz solar, se produce una proliferación de algas que al morir se pudren.

Por ello, siempre que sea posible se muestrearán manantiales o pozos adecuadamente sellados y que bombeen agua regularmente. En caso contrario se aconseja extraer un volumen de agua varias veces el almacenado en el pozo (al menos tres veces) antes del muestreo.

Recordemos que las aguas subterráneas se depuran por decantación, por lo que un fuerte bombeo puede provocar por removilización un aumento del contenido microbiano no representativo del acuífero.

---

### 7.2.- EQUIPOS DE MUESTREO

---

Si el punto a muestrear tiene un equipo de extracción que funciona con regularidad, se podrá utilizar éste para la toma de una muestra representativa

Si la instalación permanente no permite el muestreo cerca del pozo, o en estudios

específicos en los que el propio equipo de extracción puede ser fuente de contaminación (p. ej. bacterias ferroxidantes) se puede sacar la muestra con un tomamuestras o bomba de succión después de haber renovado el agua con el equipo fijo del pozo.

Existe una variedad de dispositivos de extracción para pozos no equipados. De más sencillos a más sofisticados se tienen:

- Botellas tomamuestras. No permiten renovar la columna de agua del pozo. Las hay de varios tipos; los más sencillos solo permiten tomar la muestra de la parte superior de la lámina de agua. Muchas pueden ser esterilizadas, y todas desinfectadas.

- Tubo con válvula de fondo. Se coloca una válvula de no retorno en el extremo inferior de una tubería que se introduce en el sondeo, y se extrae el agua por agitación manual de esta tubería. El conjunto puede ser esterilizado y tener un diámetro reducido, pero no permite renovar la columna de agua del pozo a no ser utilizando agitadores mecánicos.

- Bombas de succión. Varían desde bombas peristálticas de pequeño caudal hasta bombas centrífugas con motor de gasolina que permite renovar el agua del pozo. Solo sirven si el nivel del agua está a menos de 8 metros de profundidad. Se puede esterilizar el tubo de aspiración e intercalar una botella antes de la bomba o desinfectar el conjunto, lo que es más práctico.

- Equipos de elevación por aire comprimido (air-lift). No garantizan la conservación de las condiciones redox del agua a muestrear. Permiten por el contrario

renovar la columna de agua del pozo para muestrear después por otro sistema. Se pueden desinfectar pero no esterilizar.

- Bomba de desplazamiento positivo del agua con aire comprimido: la exposición del agua al aire es menor que con "airlift" pero los caudales también. Se pueden desinfectar pero no esterilizar.

- Bombas de pistón accionado por aire. No hay contacto con el aire. Su principal inconveniente es su elevado precio.

- Bombas eléctricas sumergibles. Permiten extraer grandes volúmenes de agua. Su inconveniente es su elevado precio y poca transportabilidad.

Desde el punto de vista práctico, lo más sencillo es utilizar botellas tomamuestras. La esterilización e incluso desinfección del equipo de muestreo entre dos muestras consecutivas es una labor engorrosa, por lo que se aconseja utilizar varios tomamuestras, idealmente uno para cada punto a muestrear.

---

### 7.3.- MUESTREO Y CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS

---

Las muestras han de recogerse siempre en envases estériles. Lo ideal son recipientes de vidrio con tapón de rosca que cierren herméticamente, que previamente se esterilizan en autoclave. Existen en el mercado recipientes de plástico estériles de un solo uso, para recogida de muestras de orina. Se pueden usar estos recipientes, pero es necesario tener en cuenta que

muchos de ellos no son perfectamente herméticos por lo que no garantizan la adecuada conservación de la muestra.

En el momento del muestreo es necesario tener en cuenta que en el aire, nuestras manos y nuestro aliento hay microorganismos, por lo que las botellas han de estar abiertas el menor tiempo posible, y hay que evitar tocar su interior y los bordes de la botella con las manos o cualquier objeto. Si se investigan bacterias aerobias (es lo habitual) no es necesario llenar hasta arriba los recipientes. El análisis de anaerobios estrictos requiere precauciones especiales para evitar el contacto de la muestra con el aire.

Tras el muestreo las botellas deben permanecer en posición vertical para prevenir la posible falta de estanqueidad. No se debe poner teflón o similar a la rosca puesto que se contaminaría la muestra. Es conveniente refrigerar la muestra inmediatamente a la toma, especialmente en verano. Es habitual el uso de neveras de campo con hielo o acumuladores térmicos.

El tiempo transcurrido entre el muestreo y la siembra de las placas no debe ser superior a 6 horas (12 horas si las muestras están adecuadamente refrigeradas). Se recomienda que la siembra siempre se haga el mismo día que el muestreo. Esto da lugar a problemas logísticos, dado que hay laboratorios que no aceptan la entrada de muestras los jueves y viernes para no tener que trabajar el sábado y domingo (las placas hay que leerlas a las 24 y 48 horas).

---

#### 7.4.- FUNDAMENTOS DE LOS ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

---

Existen dos técnicas básicas para determinar las bacterias existentes en una muestra de agua o suelo. La primera de ellas es la observación directa al microscopio (normalmente sobre muestras teñidas) y la segunda el cultivo en un medio adecuado en el que las bacterias proliferan formando colonias visibles a simple vista, también puede detectarse la presencia de determinadas bacterias o grupos afines mediante el cultivo en medios especiales y la observación de reacciones específicas (producción de ácido, producción de gas, empleo de sustratos de crecimiento especiales). El recuento puede hacerse directamente sobre las placas de cultivo o sembrando diluciones en tubos y contando los tubos que dan reacción positiva (NMP o técnica del número más probable).

También puede utilizarse el método de filtración en el que la muestra se pasa a través de un filtro de 0,45 micras, reteniendo los microorganismos, este filtro se deposita directamente sobre una placa con el medio de cultivo apropiado.

Otras técnicas cuya aplicación no está tan generalizada evalúan el contenido en microorganismos por medidas indirectas, como análisis de enzimas, ATP, ADN, bioluminiscencia, etc, o técnicas especiales como el ensayo de *Limulus* para bacterias gram-negativas o contadores de partículas microelectrónicos.

Los métodos de análisis de aguas destinadas a consumo se basan en el cultivo en medios nutritivos. Básicamente, se añade

**8. MEDIDAS PREVENTIVAS Y PALIATIVAS PARA EL CONTROL DE MICROORGANISMOS**

**8.1. *Depuración de aguas residuales***

**8.2. *Criterios para la construcción y ubicación de captaciones***

**8.3. *Perímetros de protección***

**8.4. *Técnicas de depuración de aguas destinadas al consumo***

---

## 8.- MEDIDAS PREVENTIVAS Y PALIATIVAS PARA EL CONTROL DE LOS MICROORGANISMOS

---

---

### 8.1.- DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

---

La mejor forma de asegurar una buena calidad para las aguas de consumo consiste en prevenir su contaminación. Es por tanto esencial realizar una depuración previa al vertido de las aguas residuales, reduciéndose de esta forma el riesgo de transmisión de patógenos

#### A) MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Son adecuados para reducidos niveles de vertido. Presentan como principal ventaja su reducido coste de mantenimiento y facilidad de operación, además proporcionan un buen nivel de eliminación de organismos patógenos.

##### *A-1) Lagunaje:*

Se trata de un grupo de estanques a través de los cuales se hace circular el agua residual; en los estanques la acción bacteriana degrada gran parte de la materia orgánica, descomponiéndola. Se trata de un sistema de bajo coste de operación y mantenimiento, pero requiere de una cierta superficie de terreno para construir las lagunas.

Generalmente el agua atraviesa primero una o varias lagunas anaerobias (2 a 4 metros

de profundidad y entre 0,1 y 0,4 kg DBO/m<sup>3</sup>/día) o aerobias facultativas (1 a 2 metros de profundidad) que eliminan la mayor parte de DBO y materia orgánica, pasando posteriormente a las lagunas aerobias (0,3 a 1 metro de profundidad) que eliminan los organismos patógenos que quedan y reducen la DBO al mínimo.

##### *A-2) Filtro verde:*

Consiste en regar un cultivo (generalmente de carácter forestal y en concreto choperas) con aguas residuales urbanas, sometidas previamente a un proceso de eliminación de los elementos más gruesos, desarenado y desengrasado. La descontaminación se produce por efecto de la acción física y química del suelo (filtrado mecánico, adsorción, reacciones redox, etc) así como por la acción biológica de las bacterias, hongos y otros microorganismos

Es aplicable a poblaciones no muy grandes (máximo 25.000 habitantes) cuyos vertidos no contengan sustancias tóxicas para los cultivos y si se dispone de suficiente terreno (alrededor de 1 Ha por cada 200 habitantes) susceptible de ser transformado en regadío.

Los procesos de depuración son llevados a cabo por los microorganismos del horizonte superior del suelo (hasta una profundidad aproximada de 1,20 m). La eliminación de bacterias fecales es similar a la conseguida mediante un proceso secundario convencional.

Los filtros verdes tienen un alto riesgo de afección a las aguas subterráneas al realizar vertidos de aguas residuales directamente sobre el terreno.



*A-3) Lechos de turba:*

Consiste en hacer pasar el agua (previa eliminación de elementos gruesos, arenas y grasas) por una capa de turba sobre otra de arena y esta a su vez sobre otra de gravas. La turba gracias a sus propiedades adsorbentes y de formación de complejos, así como al intenso desarrollo de microorganismos, consigue una importante depuración del agua, obteniéndose unos elevados rendimientos medios.

*A-4) Discos rotativos (biodiscos):*

Tras someter al agua a un proceso de filtrado y decantación se hace pasar a través de un tanque en el cual giran a lo largo de unos ejes varios discos parcialmente sumergidos (aproximadamente un 40 %). Sobre la superficie de los discos se produce un intenso desarrollo de microorganismos (bacterias, algas, protozoos) que al ser sucesivamente expuestos al aire y al agua recogen oxígeno y materias nutrientes, produciéndose además una intensa aireación de la masa acuosa. La biomasa formada de esta manera termina desprendiéndose de los discos y cayendo al agua, siendo posteriormente separada en un clarificador secundario dispuesto a la salida del sistema.

El rendimiento del proceso se calcula entorno al 80 - 90% proporcionando en general una eficaz eliminación de microorganismos patógenos.

**B) SISTEMAS CLÁSICOS DE DEPURACIÓN**

Los sistemas tradicionales de depuración de aguas (tratamiento primario + secundario +

terciario, que se corresponden con tratamiento físico, biológico y químico) consiguen una reducción muy eficaz de la carga contaminante de grandes volúmenes de agua. Requieren unas instalaciones complejas, atendidas por personal cualificado y un importante consumo de energía.

*B-1) Tratamiento primario:*

Consiste en eliminar las partículas en suspensión contenidas en el agua residual y dejarla en condiciones adecuadas para el desarrollo de microorganismos en etapas posteriores. Los procesos implicados son:

- Sedimentación: eliminación de sólidos en suspensión por acción de la gravedad.
- Flotación con aire: se introducen burbujas de aire, que forman una espuma donde se adhieren los aceites, grasas y sólidos de tamaño muy fino que después son eliminadas mediante un sistema mecánico.
- Floculación: adición de floculantes, sustancias que facilitan la agregación y sedimentación de las partículas coloidales.
- Neutralización: corrección del pH si no es adecuado para las fases siguientes del tratamiento o para su vertido.

*B-2) Tratamiento secundario*

Consiste en la eliminación de la materia orgánica por oxidación biológica. El proceso consiste en mantener una importante población microbiana en condiciones aerobias de forma que empleen como sustrato de crecimiento las materias presentes en el agua residual.

### - Lodos activados:

En este sistema el agua a depurar se introduce en un depósito convenientemente agitado y aireado en el que el cultivo bacteriano se encuentra en forma de flóculos. Tras un tiempo suficiente las bacterias han degradado la materia orgánica; se somete entonces la mezcla a un proceso de decantación para separar los flóculos (que forman un fango que será posteriormente tratado) y el agua depurada.

### - Lechos bacterianos:

En este sistema el cultivo bacteriano se dispone en la superficie de un soporte, en lugar de encontrarse como flóculos en toda la masa de agua a depurar como en los lodos activados. El agua a tratar se hace caer en forma de lluvia sobre el soporte (natural o sintético, tiene que tener la mayor superficie posible) sobre el cual se ha desarrollado una película de microorganismos que incrementan su biomasa a partir de los nutrientes que lleva el agua y del oxígeno del aire. Al igual que en el caso anterior se producen unos fangos que serán tratados posteriormente.

### - Tratamiento de los lodos:

En las distintas fases del tratamiento se producen lodos de características diferentes. En los decantadores primarios se trata de las partículas más gruesas transportadas por el agua bruta, y los secundarios contienen partículas más finas y biomasa de los microorganismos que realizan la depuración del agua. Muchas veces se mezclan unos y otros formando lodos mixtos. Además los lodos pueden contener aditivos añadidos al agua en cualquiera de las etapas.

Los tratamientos que se dan a los lodos son:

- **Concentración**, consistente en eliminar la mayor cantidad de agua posible del lodo mediante espesamiento, flotación o centrifugado.

- **Digestión** (aerobia o anaerobia), que destruye la materia orgánica por la acción de microorganismos. La forma más empleada es la digestión anaerobia pues consume menos energía y tiene mejor rendimiento.

- **Incineración**, tras reducir al mínimo la fracción de agua a fin de gastar la menor cantidad de energía posible.

- **Acondicionamiento**. Se suele añadir a los lodos sustancias flocculantes a fin de romper su estructura coloidal y mejorar sus características de filtrabilidad. Las sustancias más empleadas son  $Cl_3Fe$  y  $CaO$ . También se emplean el sulfato de alúmina y el polielectrolito.

- **Deshidratación**. Los métodos más empleados son: eras de secado, filtros de vacío, filtros prensa y centrifugación.

### *B-3) Tratamiento terciario:*

Son procedimientos que se emplean cuando se precisa una calidad muy alta en el agua de salida, o la recuperación de sustancias valiosas o muy tóxicas. Los procedimientos más empleados son:

### - Adsorción:

Se emplea para eliminar del agua fenoles, hidrocarburos aromáticos, derivados clorados, etc. También colores, sabores u

olores extraños. Como adsorbentes se emplean el gel de sílice, alúmina, resinas orgánicas y carbón activo, siendo este último el más utilizado por sus excelentes propiedades adsorbentes, precio y facilidad de regeneración.

La eficacia de diferentes tratamientos se resume en la tabla 8.1

Tabla 8.1.- Eficacia de los distintos métodos de tratamiento de aguas negras.

MÉTODO	PORCENTAJE DE ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	PORCENTAJE DE ELIMINACIÓN DE BACTERIAS
Sedimentación completa	40 - 95	40 - 75
Fosa séptica	40 - 75	40 - 75
Filtro de arena intermitente	40 - 98	98 - 99
Lodos activados	70 - 97	95 - 99

Fuente: Gainez et al. (1988)

**- Cambio iónico:**

Se emplean casi exclusivamente resinas orgánicas sintéticas, eliminándose por este sistema compuestos radiactivos, mercurio, cromatos, cianuros, oro, etc.

**- Ultrafiltración:**

Se emplea para separar macromoléculas superiores a un determinado tamaño en función del polímero sintético que forme la membrana. Se emplea en algunos vertidos industriales como: recuperación de suero, tratamiento de aceites usados, aguas de lavado de cabinas de pintura, etc.

**- Ósmosis inversa:**

Se aplica para la recuperación de metales, depuración de agua de mar, etc.

**C) FOSAS SÉPTICAS**

Se trata de pequeñas instalaciones empleadas normalmente en viviendas aisladas donde no es posible construir un sistema convencional de alcantarillado.

Las aguas residuales son vertidas en un tanque cerrado e impermeabilizado donde se produce la digestión y almacenamiento del fango. En sistemas más elaborados, se conectan dos o mas tanques en serie, de forma que se consigue una mayor capacidad de almacenamiento. La limpieza se realiza cada dos o tres años.

## 8.2.- CRITERIOS PARA LA UBICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE CAPTACIONES

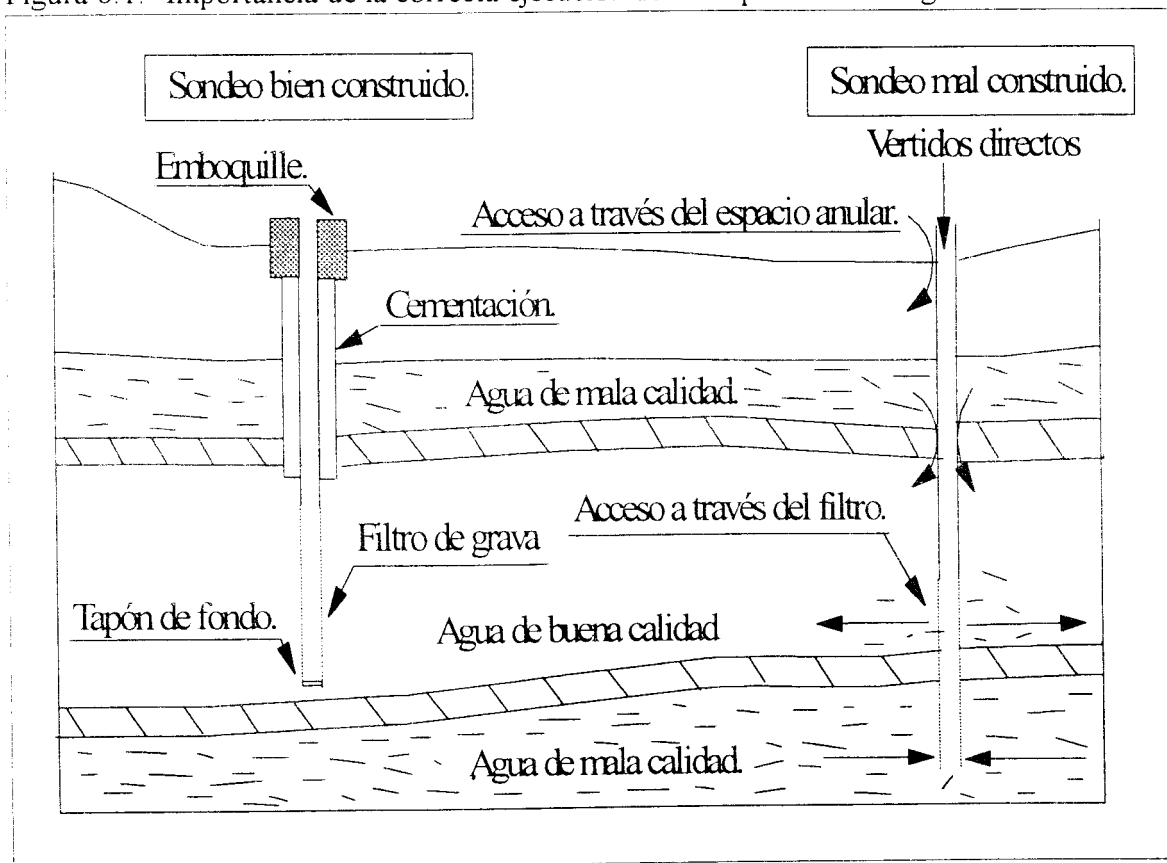
### A) UBICACIÓN DE CAPTACIONES

Se exponen a continuación una serie de recomendaciones encaminadas a evitar que las captaciones de aguas (pozos y sondeos) puedan provocar la contaminación de las aguas subterráneas al poner en contacto los niveles acuíferos con los focos potenciales de contaminación

Las normas básicas que hay que tener en cuenta para minimizar el riesgo de contaminación de las futuras captaciones son:

- Situar la captación lejos de los focos potencialmente contaminantes.
- Las vías principales de circulación del agua (es decir, los grandes manantiales y las zonas más permeables del acuífero, donde los pozos dan mayores caudales) son las más expuestas a la contaminación microbiológica.
- La captación deberá ubicarse donde la zona no saturada sea más impermeable y más potente. Lo ideal son acuíferos

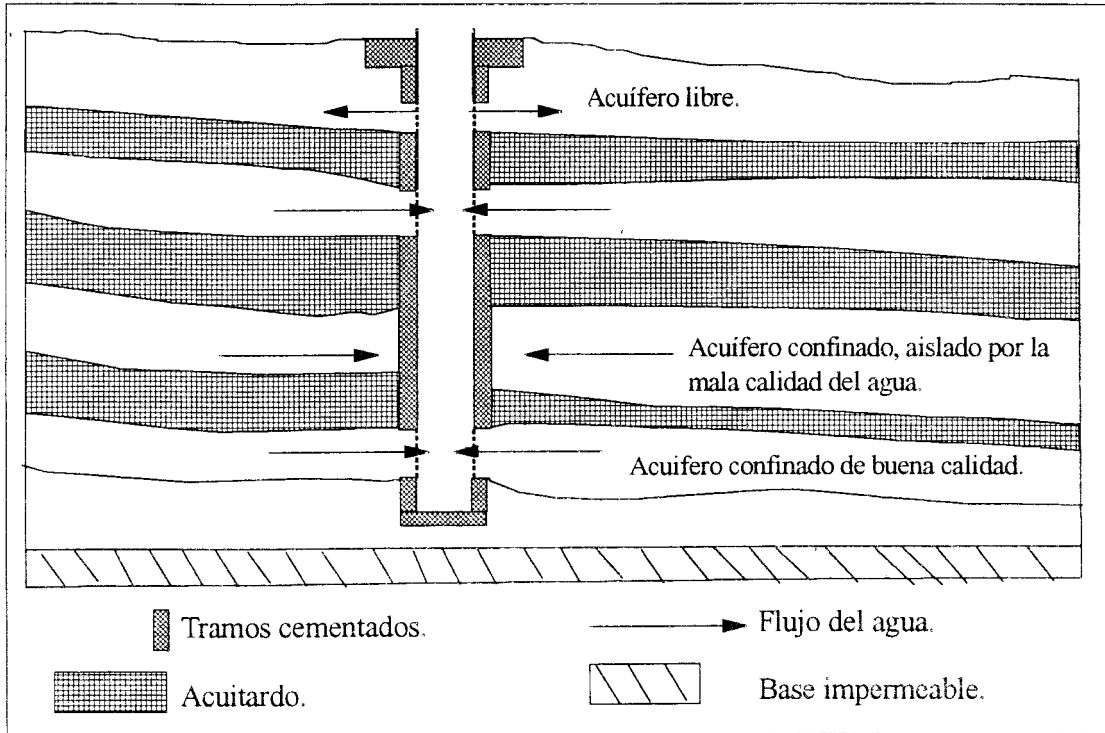
Figura 8.1.- Importancia de la correcta ejecución de las captaciones de aguas subterráneas.



confinados, y en acuíferos multicapa los niveles más profundos. En el extremo opuesto están los acuíferos kársticos y los aluviales.

La norma más importante a tener en cuenta es que el propio pozo es la vía más directa por la que puede entrar una contaminación a las aguas subterráneas. Se deben poner

Figura 8.2.- Esquema del mecanismo de protección de un sondeo correctamente construido.



## B) NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE CAPTACIONES

La captación de aguas subterráneas para consumo se encuentra dentro del sistema de abastecimiento, formando parte de sus instalaciones, por lo que deberá cumplir con la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de las aguas potables de consumo público (RD 1138/1990). No obstante, lo que se dice a continuación es aplicable también a captaciones destinadas a la agricultura, industria u otros fines.

todas las barreras necesarias para que esto no ocurra.

Un pozo adecuado para abastecimiento puede estar constituido por:

- Un recinto vallado de tamaño suficiente para no entorpecer las maniobras de cambio de la bomba, cuyo acceso estará limitado al personal de mantenimiento. Dentro de este recinto se limpiarán minuciosamente los posibles restos de suciedad, plantas y materia orgánica.

Una caseta cerrada, dentro de la cual se sitúa el pozo o sondeo. El suelo estará

impermeabilizado y un desagüe recogerá las posibles escorrentías y las sacará fuera del recinto. El techo será practicable para facilitar el cambio del equipo de extracción.

- El pozo tendrá el emboquille sobresaliendo del terreno y con tubería ciega en los niveles acuíferos más superficiales. El espacio anular entre la tubería ciega y el terreno estará impermeabilizado con cemento u otro sellador en toda su longitud. En las normas de la American Water Works Association para pozos profundos se describen distintas técnicas para realizar esta operación.

- La captación ha de estar cubierta para evitar el vertido directo, la lluvia, los rayos solares y las deyecciones de aves.

- El equipo de extracción ha de ser eléctrico, y no dejar ningún lugar por donde accidentalmente puedan caer grasas u otras sustancias al pozo.

- El pozo será desinfectado con cloro previamente a su uso. Es una operación sencilla y económica que permite obtener agua de buena calidad desde el comienzo, dado que inicialmente hay microorganismos del exterior introducidos durante las operaciones de perforación.

Por último es conveniente recordar que todos los sondeos para abastecimiento o embotellado de agua deben contar con su preceptivo perímetro de protección, debiendo la autoridad competente velar por el cumplimiento de las restricciones impuestas sobre el uso del suelo en la definición del perímetro.

---

### 8.3.- PERÍMETROS DE PROTECCIÓN

---

La actual legislación española (ley de aguas de 2 de agosto de 1.985, Reglamento del dominio público hidráulico de 11 de abril de 1.986, Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de las aguas potables de consumo público de 14 de septiembre de 1.990, Ley de minas de 11 de julio de 1.973) establece la figura del perímetro de protección como garante de la calidad química y bacteriológica de las aguas subterráneas destinadas al consumo humano.

Se entiende por perímetro de protección: *un área entorno a una captación de aguas subterráneas, en la cual de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades o instalaciones capaces de introducir una contaminación en el acuífero.*

Así pues el perímetro debe garantizar que la calidad del agua no se verá afectada, y no sobrepasará en ningún caso los límites establecidos por la vigente legislación para las aguas de consumo y para las aguas envasadas.

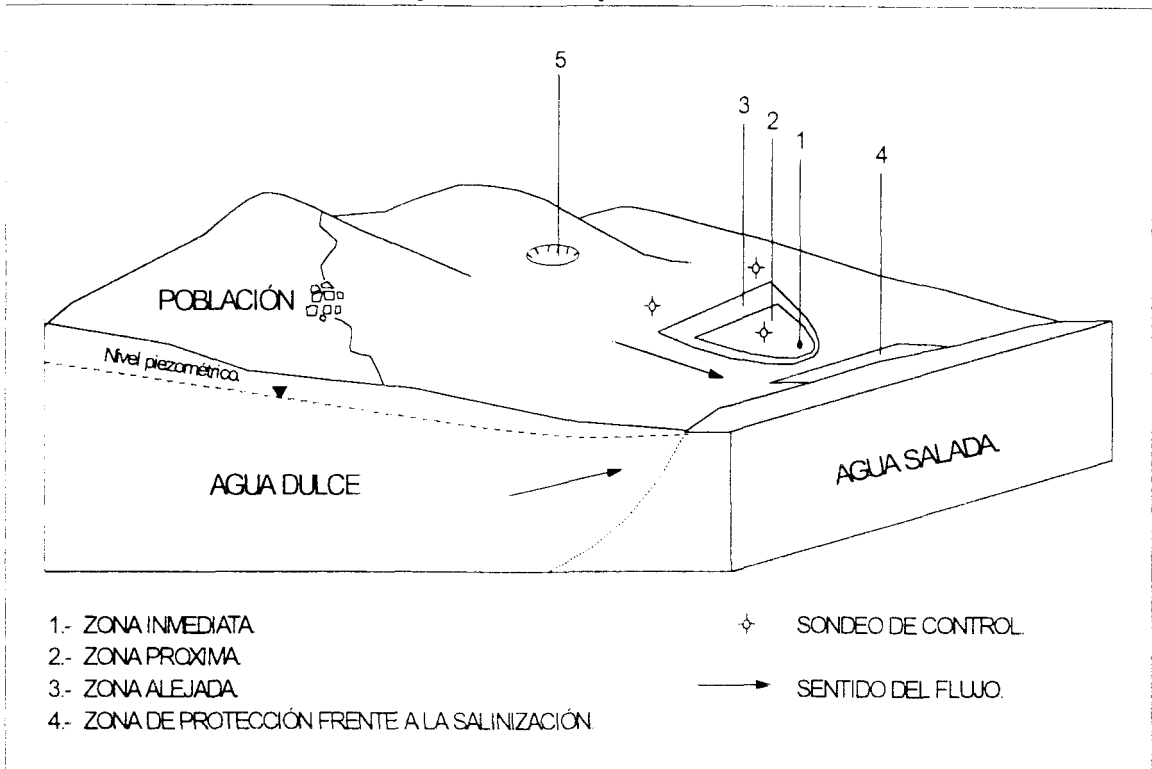
El sistema más frecuentemente empleado consiste en dividir el perímetro en varias zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuestas sobre ellas:

**1- Zona inmediata, o de restricciones absolutas.** Es la más próxima a la captación, protegiendo a ésta y sus

instalaciones contra las inclemencias climatológicas y desaprensivos, además impide los vertidos e infiltraciones directas sobre la misma. El criterio de dimensionado suele ser un tiempo de tránsito de 24 horas o una pequeña área (100 - 400 m<sup>2</sup>) fijada de forma arbitraria. Las restricciones serán

la sustancia extraña llegue a la captación. Se dimensiona generalmente en función de un tiempo de tránsito de 50 - 60 días, consiguiéndose una buena protección contra la contaminación bacteriológica y lo más eficaz posible contra la química.

Figura 8.3.- Zonificación de los perímetros de protección.



absolutas, impidiéndose cualquier tipo de actividad.

**2- Zona próxima o de restricciones máximas:** representa el cuerpo principal del perímetro, comprende un área de extensión variable, pero suficiente para proteger el agua contra su contaminación, ya sea asegurando la inactivación, eliminación o dilución del contaminante, ya sea permitiendo una alerta a tiempo para tomar las medidas adecuadas antes de que

**3- Zona alejada o de restricciones moderadas.** Debe proteger la captación contra contaminantes de larga persistencia, básicamente contaminación química no degradable o difícilmente degradable. El funcionamiento de este área se basa en los procesos de dilución o de alarma además de la degradación e inactivación. Se dimensiona según un tiempo de tránsito de 10 años, o más frecuentemente en base a consideraciones hidrogeológicas, abarcando muchas veces todo el área de

alimentación de la captación. Al ocupar esta tercera zona una superficie muy extensa se restringen únicamente aquellas actividades que por su peligrosidad o características especiales provocarían un proceso contaminante imposible de controlar aún cuando se produjera en un lugar alejado de la captación que se desea proteger.

**4- Zonas satélites de protección.** En ciertas circunstancias pueden definirse áreas de restricción que delimitan superficies alejadas de la captación y situadas fuera del sistema de protección del perímetro anteriormente descrito, pero que presentan una conexión hidráulica directa o preferente a través de conductos o fisuras con el punto de captación del agua. Estas "zonas satélites de protección" cobran una especial relevancia en acuíferos kársticos y fisurados, donde sus especiales características estructurales facilitan la aparición de estos fenómenos. Las restricciones serán las mismas que para la zona próxima. Para su localización es imprescindible un estudio hidrogeológico en detalle del acuífero.

**5- Área de protección frente a la salinización.** Se definen en regiones costeras, donde la intrusión de agua de mar puede provocar la salinización del agua subterránea. En estas áreas se restringen los bombeos a fin de evitar el avance del frente salino

Con respecto a la contaminación de carácter microbiológico hay que considerar que el perímetro garantiza la calidad del agua asegurando un tiempo de tránsito mínimo para el agua subterránea, tiempo que no sería suficiente por sí solo para eliminar muchos de los microorganismos

comunes en las aguas contaminadas, pero al que deben sumarse otras acciones como son la interacción con los materiales del suelo y del acuífero, acción de bacteriófagos, etc, siendo gracias a la concurrencia de todos estos factores como se elimina la contaminación.

Las bacterias, al ir atravesando el acuífero disminuyen en número, pero además aumenta el tiempo de regeneración, con lo que la proporción relativa de estas decrece aún con más rapidez. Además, factores tales como contenido en nutrientes, contenido en materia orgánica, etc, han de ser considerados.

---

#### 8.4.- TÉCNICAS DE DEPURACIÓN DE AGUAS DESTINADAS A CONSUMO

---

A pesar de todas las medidas que se toman para evitar la contaminación de las aguas, muchas veces éstas no presentan una calidad adecuada para el abastecimiento. Por ello la RTS para el abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables de consumo público habla en su título IV sobre los tratamientos que deben recibir las aguas para adecuar sus características microbiológicas a lo exigido por la reglamentación. En todo caso las aguas destinadas al consumo público deben ser sometidas, previa a su distribución, al tratamiento de desinfección.

El proceso más frecuentemente empleado es el de decantación/filtración, coagulación/floculación, que elimina una



Tabla 8.3 1.- Dosis de cloro residual en aguas de consumo recomendadas por la O.M.S.

Valor del pH	Cloro residual libre en ppm durante un mínimo de 10 minutos	Cloro residual combinado en ppm durante 60 minutos al menos
6,0 - 7,0	0,2	1,0
7,0 - 8,0	0,2	1,5
8,0 - 9,0	0,4	1,8
9,0 - 10,0	0,8	No lo recomienda
Más de 10	Más de 0,8 (con contacto mas largo)	No lo recomienda

Fuente: Cabo et al. 1972.

buena parte de la turbidez del agua y su micropoblación, para luego someter el agua al proceso de desinfección propiamente dicho y cuando ello es necesario a la corrección del pH, ajuste del cloro residual y fluoración.

La eficacia de la filtración depende básicamente del tamaño de elementos a eliminar y del tipo de filtro empleado. Es más eficaz si se procede a una floculación y decantación previas. Se muestra muy eficaz con organismos grandes tales como lombrices intestinales o sus huevos. Ante bacterias el rendimiento varía entre un 50 % y un 90-99 % según el método. Los virus pasan por los poros de los filtros normalmente empleados. El método solo es aplicable para pequeños volúmenes de agua.

Los agentes desinfectantes normalmente empleados son oxidantes enérgicos que provocan la muerte de las bacterias patógenas que pudieran existir en el agua. La actual reglamentación (Resolución de 23 de abril de 1.984 por la que se aprueba

la lista positiva de aditivos y coadyuvantes tecnológicos autorizados para tratamiento de las aguas potables de consumo público) admite el empleo de los siguientes productos: Cloro, Hipoclorito sódico, cálcico o magnésico, Clorito sódico Amoniaco, Ozono, Permanganato potásico, Sulfato de plata, Cloruro de plata, Complejo sódico de cloruro de Plata electrolítica

La desinfección del agua con cloro u otro desinfectante no esteriliza el agua, es decir no elimina la totalidad de las bacterias. Si posteriormente a la desinfección no queda una cantidad suficiente de cloro residual las bacterias pueden volver a reproducirse en la red de distribución.

La plata y sus derivados poseen una marcada acción bactericida pero debido a su precio solo se emplean en casos especiales, cuando no existe otro sistema de desinfección disponible.

La radiación ultravioleta (no se incluye entre los métodos aprobados por la

legislación) se emplea para pequeños volúmenes de agua clara. La elevada acción microbicida de esta radiación se ve frenada por su bajo poder penetrante en el agua (basta 5 cm para que se pierda el 30 % de la radiación si el agua es clara y solo 1 cm en aguas de río sin filtrar). Sin embargo el rendimiento no se ve afectado por las condiciones físico-químicas del agua. Se emplean dosis de 1.000 a 6.000  $\mu\text{W/S/cm}^2$  de 2.400 a 2.800 nm. El efecto microbicida es mayor para bacterias que para virus, hongos y formas esporuladas.

La ozonización es un proceso caro que se emplea cuando no se desea la presencia de cloro residual. Normalmente se emplea aire ozonizado al hacerlo pasar por un sistema de arco eléctrico. Presenta como ventajas: no deja olor ni sabor alguno, no existe peligro de sobredosificar y es poco sensible al pH y temperatura. Las dosis necesarias vienen a ser de 1,5 a 2 mg/l para aguas normales, aumentando para altos valores de DQO.

Por último, el desinfectante más empleado en España es sin duda el cloro en sus diferentes formas. El cloro ejerce su acción desinfectante tanto en estado elemental como en forma de ácido hipocloroso no disociado (HOCl). La acción del cloro depende del pH, siendo por ejemplo diez veces mayor a pH 6 que a pH 9. A pH 7 la concentración necesaria para matar la mayor parte de los microorganismos en 15 a 30 segundos (en condiciones óptimas, la presencia de materia orgánica aumenta sensiblemente este tiempo) varía entre 0,1 y 0,25 ppm.

Las grandes ventajas que presenta la cloración son

- Bajo costo.
- Facilidad de aplicación, prestándose muy bien al empleo de sistemas automatizados para el tratamiento de grandes volúmenes de agua.
- Importante acción microbicida, tanto sobre bacterias como sobre virus y amebas.
- Efecto residual controlable.

Por el contrario sus mayores inconvenientes son:

- Confiere un sabor característico al agua que la inutiliza para ciertos usos (por ejemplo ciertas industrias alimentarias).
- El cloro se combina con la materia orgánica produciendo cloraminas a las que se atribuye capacidad cancerígena.
- A las dosis normales de uso no presenta efecto alguno sobre los humanos, pero algunos animales de granja lo toleran mal, debiendo eliminarse o emplear otro sistema de desinfección.
- Cuando el agua tiene una elevada concentración de materia orgánica la acción del cloro es mucho menor, por lo que ha de ser previamente eliminada. Así, para conseguir 0,2 - 0,4 ppm de cloro residual en agua limpia son necesarios 0,5 ppm. Sin embargo en aguas muy sucias se llegan a necesitar 20 ppm.

Según Cabo et al. los factores a considerar para obtener una cloración efectiva son:

- a) Contenido y naturaleza de las sustancias orgánicas y de la materia en suspensión. La materia orgánica, sulfuros, nitritos, hierro,

etc absorben o destruyen el cloro, disminuyendo el disponible para la acción microbicida

b) Temperatura. Cuanto mayor es la temperatura, se requiere un menor tiempo de contacto.

c) pH. A mayor pH se requieren mayores concentraciones de cloro.

d) Tiempo de contacto. A mayor tiempo de contacto mejor será la desinfección. En todo caso nunca debe ser inferior a 10 - 15 minutos.

e) Compuesto de cloro utilizado. Se pueden emplear muy diversos productos, destacando gas, cloraminas, dióxido de cloro y cal clorada, cada uno de ellos con diferente grado de actividad. Así, por ejemplo el dióxido de cloro posee dos veces y media la capacidad oxidante del  $\text{Cl}_2$ , siendo capaz de destruir *E. coli* en 6 segundos y poliovirus en 1 minuto a pH de 7 y concentración de 0,0001 %

Es muy importante que el cloro se reparta homogéneamente en la masa acuosa, siendo muy aconsejable la filtración previa.

una cantidad de agua a un preparado nutritivo, donde proliferan las bacterias (si las hay), dando lugar a colonias visibles a simple vista. Al cabo de un cierto tiempo se cuenta el número de colonias formado, dando el resultado en unidades formadoras de colonias (UFC).

Es importante tener presente que una unidad formadora de colonias no siempre se corresponde con una bacteria (u hongo, alga, etc). Si tenemos una partícula de materia orgánica rodeada de bacterias que la emplean como fuente de energía y materia prima, dará

lugar a una única colonia, independientemente del número de bacterias. Por esta y otras razones no hay una correspondencia directa entre los análisis realizados con medios de cultivo y las observaciones al microscopio, siendo estas últimas por lo general, de varios órdenes de magnitud mayores

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

- BENITO DE SANTOS, G. (1987). "Los virus, el SIDA y el medio hídrico". Tecnología del agua. Nº 38.
- BITTON, GERBA, (editores) (1984). Groundwater Pollution Microbiology. John Wiley & Sons. New York.
- CABO, DE LA PUENTE Y CATALAN (1972). "Bacteriología y potabilidad del agua". (Aportación de los autores al Año Internacional del libro)
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, M.R. (1983) "Hidrología subterránea. 2ª Edición" Ed. Omega S.A.
- DAVIS, B.D.; DULBECCO, R.; EISEN, H.N.; GINSBERG, WOOD, W.D; (1986) "Tratado de microbiología". Ed. Salvat, S.A.
- DIAZ-LÁZARO CARRASCO, J. A. (1988) "Depuración de aguas residuales". MOPU. Unidades temáticas ambientales de la Dirección General del Medio Ambiente.
- DIZER, H.; FILIP, Z.; LOPEZ, J.M (1985) "Laborversuche zur persistenz und zum transportverhalten von viren" Umweltbundesamt materialen 2/85.
- FLINT, K.P. (1987). "The long-term survival of E. Coli in river water". Journal of applied bacteriology, 63.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979): "Groundwater". Prentice- Hall, Inc. Englewood Cliffs, N Jersey.
- GOODMAN, L.; GILMAN, A. "Las bases farmacológicas de la terapéutica". Ed. Panamericana.
- IGME (1984). "Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo".
- ITGE (1989). Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del Norte de España. Tomo 1: Informe teórico. Proyecto para la realización de estudios de contaminación de acuíferos por actividades agrícolas, industriales y urbanas (1988-89-90).
- KOVACS, M. (1985). "Pollution Control and Conservation". Ellis Horwood Limited, Publishers.
- LOPEZ GETA, J.A.; MARTÍNEZ NAVARRETE, C.; MORENO MERINO, L. (1991) "Protección de la calidad de las aguas subterráneas de abastecimiento mediante perímetros de

protección. SMAGUA'91, Zaragoza.

MARA, D.D. and ORAGUI, J. (1985) "Bacteriological methods for distinguishing between human and animal faecal pollution of water: results of fieldwork in Nigeria and Zimbabwe". Bulletin of the World Health Organization, 63 (4) p.p.

MARTÍNEZ NAVARRETE, C.; MORENO MERINO, L.; LOPEZ GETA, J.A. (1.991) "Análisis comparativo de los métodos de determinación de perímetros de protección de las captaciones de aguas subterráneas". III Simposio sobre el agua en Andalucía. Córdoba.

MATTHESS, G.; PEKDEGER, A., SHROTER, J. (1985). "Behaviour of contaminants of groundwater. Theoretical background, hydrogeology and practice of groundwater protection" Water. Vol. 6 ed. Heise.

MORENO MERINO, L.; PEDRA GUIVERNAU, M.; NAVARRETE MARTINEZ, P. (1.991) "Redes de vigilancia y control de la calidad química de las aguas subterráneas. Doñana un caso práctico" III simposio sobre el agua en Andalucía, Córdoba.

PELCZAR, M.J., REID, R.D. and CHAN, E.C.S. (1982) "Microbiología" Ed. McGraw Hill, 4a Ed.

RHEINHEIMER, G. (1980) "Aquatic Microbiology" 2ª Edición John Wiley and Sons Eds.

RHEINHEIMER, G. (1986) "Microbiología de aguas". Ed. Acribia, S.A.

SCHLEGEL, H.G. (1975) "Microbiología General" Ed. Omega.

SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PÚBLICAS (1969).- Normas de la American Water Works Association para pozos profundos. Boletín N° 30 Informaciones y Estudios.

SMITH, M.S., THOMAS, G.W., WHITE, R.E. and RITONGA, D. (1985) "Transport of Escherichia coli through intact and disturbed soil columns". J. Environ. Qual. Vol. 14, No 1.

STANIER, R.Y., INGRAHAM, J.L., WHEELIS (1986). The microbial world, fifth edition. Prentice-Hall, New Jersey.

STEVENSON, F.J. (1.986): "Cycles of soil" Wiley- Interscience Publication. John Wiley & Sons. N. York.