

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.

Hay 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, CO₂, 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

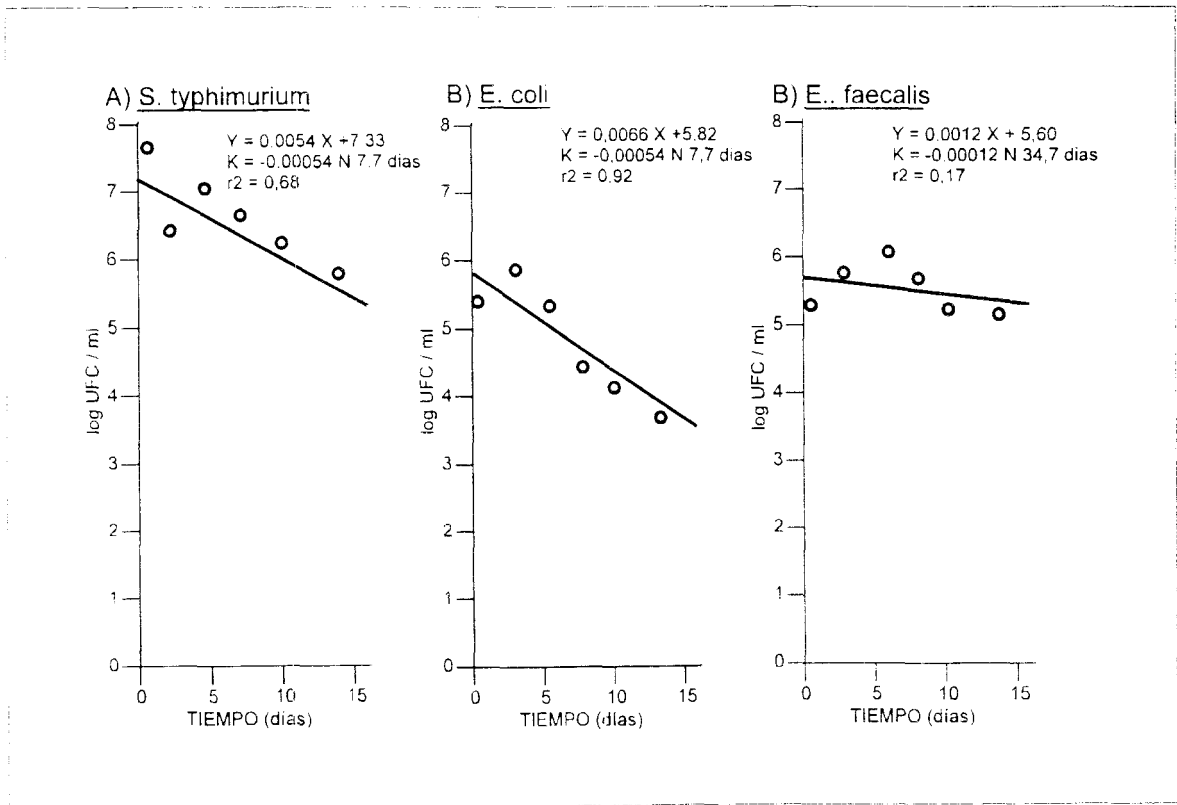
y bacterias fotosintéticas, fenómeno que no ocurre en aguas subterráneas.

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 tienen 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.

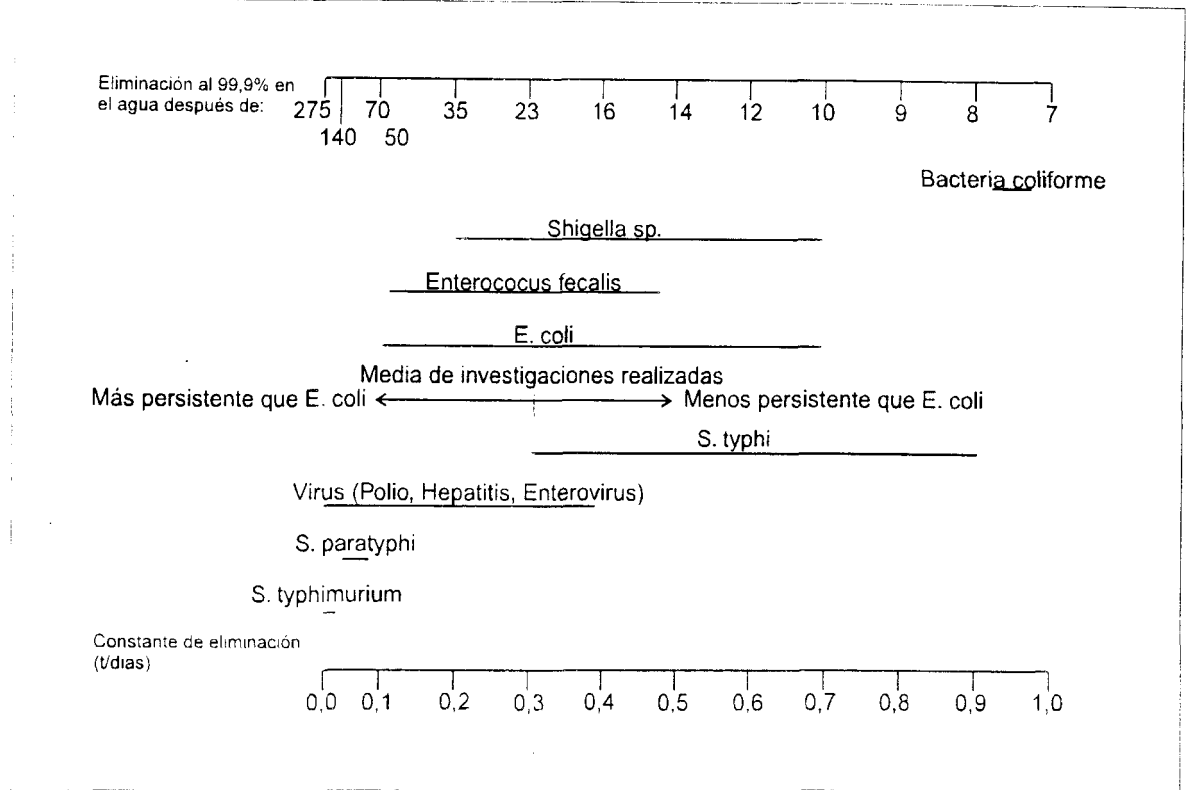
b) Temperatura

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

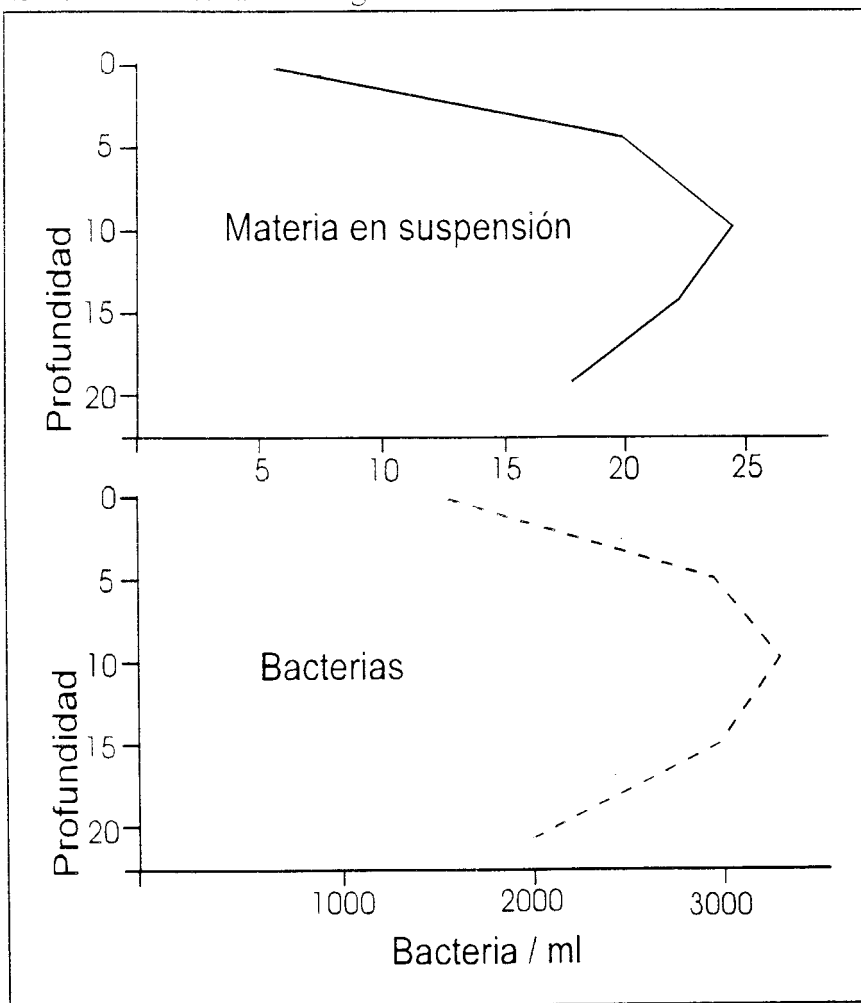
profundas. Sin embargo en la mayor parte de los casos el efecto de la presión es significativo solo con valores muy grandes, como por ejemplo a más de 100 atmósferas (1.000 metros de columna de agua). En un experimento de laboratorio se sometió a *E. coli* a un aumento de la presión de 1 000 atmósferas, 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 NO_2^- , N_2O o 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

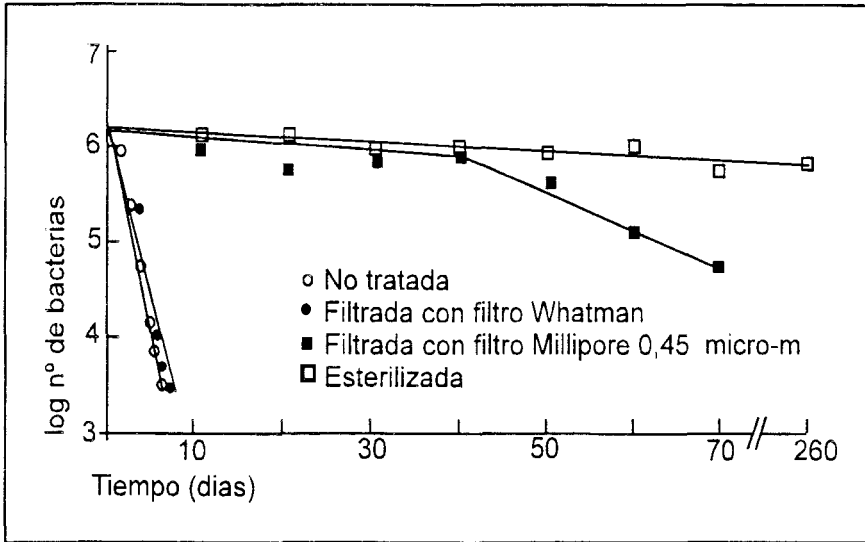
El oxígeno disuelto en el agua condiciona, como ya se ha visto, el tipo de microorganismos presentes en el agua y su metabolismo

crecimiento de muchos microorganismos pero constituye la fuente de energía de las bacterias que los oxidan si hay presencia de O_2 .

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_2) no afecta a la microflora acuática.

El CO_2 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_2 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

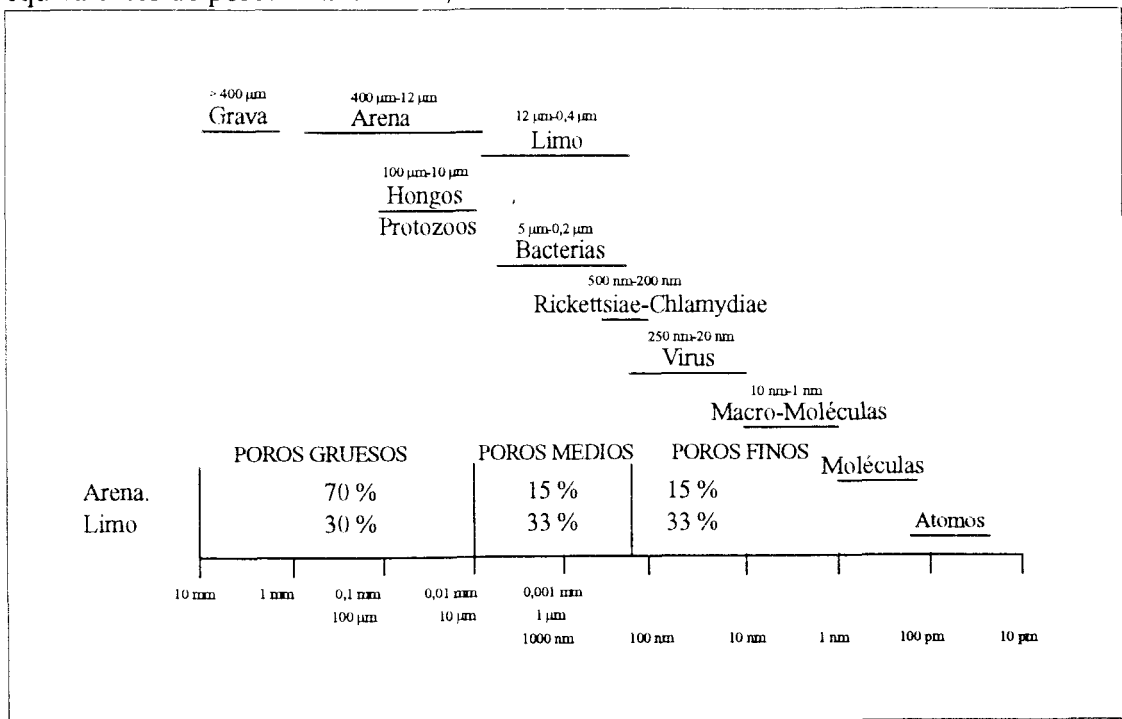
En todos los hábitats la competencia nutricional entre organismos juega un papel importante en la composición de la micropoblación. En esta lucha por conseguir nutrientes, los organismos que tienen más éxito son los que, bajo ciertas condiciones, son los más rápidos en alcanzar los nutrientes disponibles. 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.

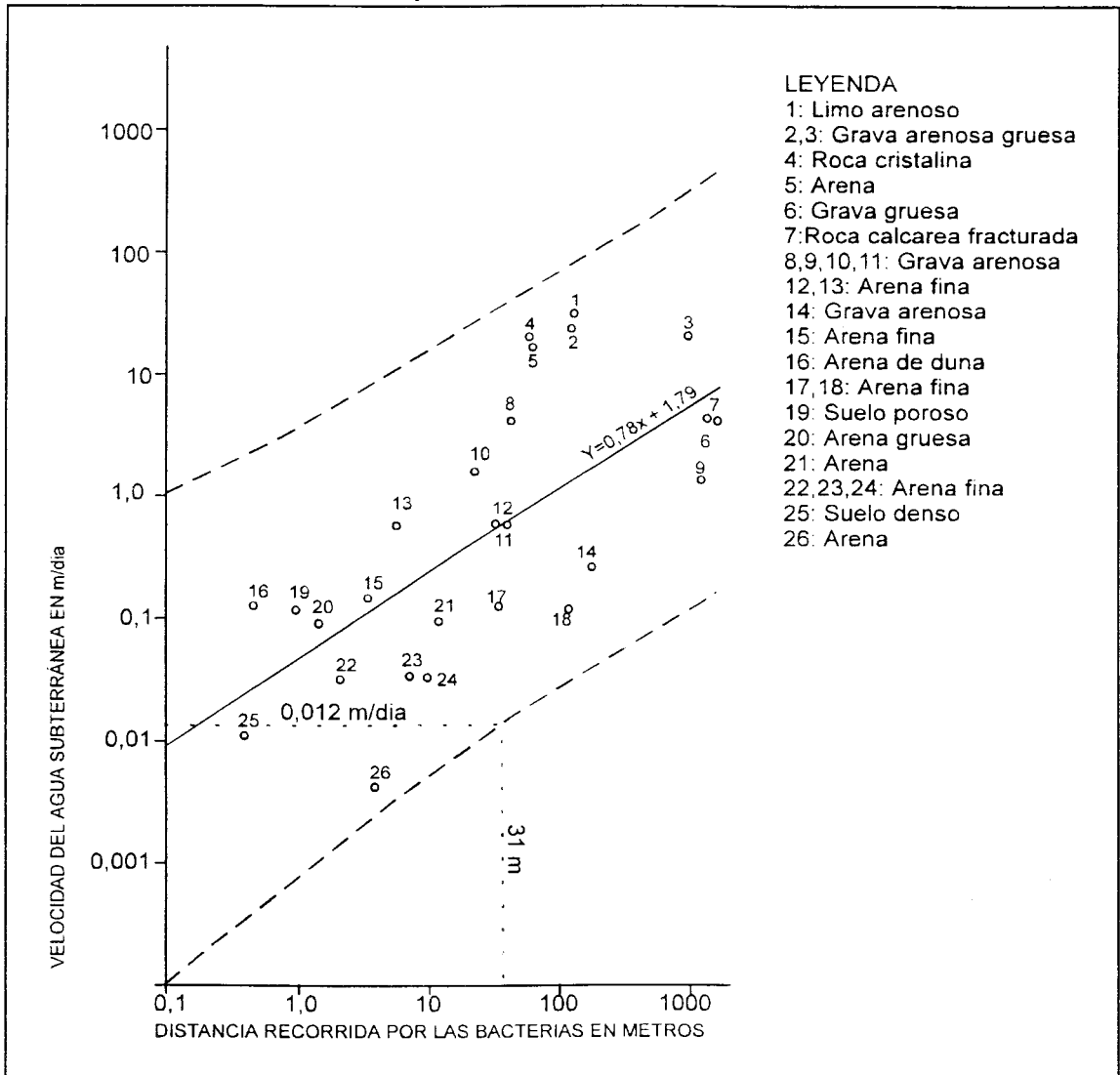
	pH	Carbono orgánico (mg/g)	Capacidad de adsorción del poadma (mg/m ³)	% Adsorción Poliovirus	
				Media	Mínima
Tierra Arcillosa	7,6	16	1,1	75	43
Turba	7,2	200	14	79	16
Oxido de hierro hidratado	7,1	0	0,0005	99,99	99,99
Magnetita	8,9	0,4	0,06	99,98	99,94

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 suelo⁵. 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

⁵ 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

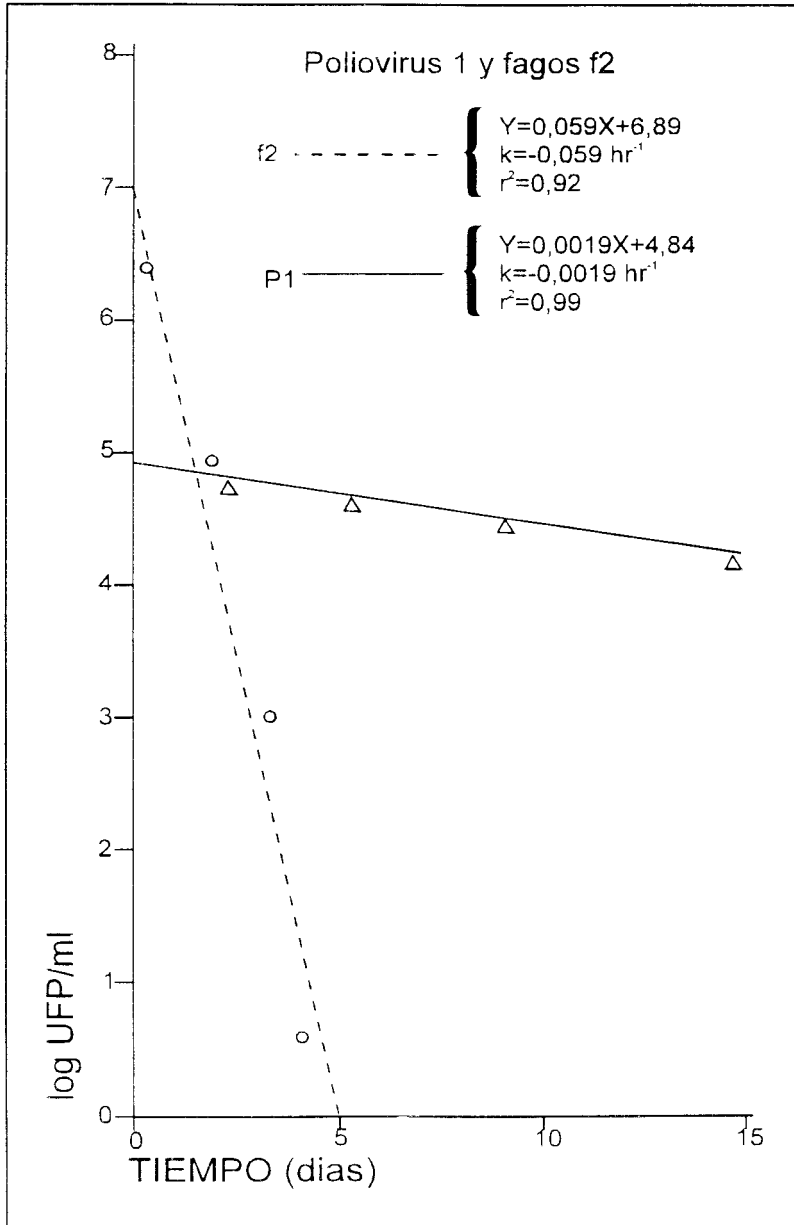
Fuente: Benito de Santos, 1987.

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 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 CO_2 , acetato, formiato y H_2

- Paralelamente, las bacterias reductoras de nitratos metabolizarán la glucosa, etanol y ácidos orgánicos transformándolos en 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 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

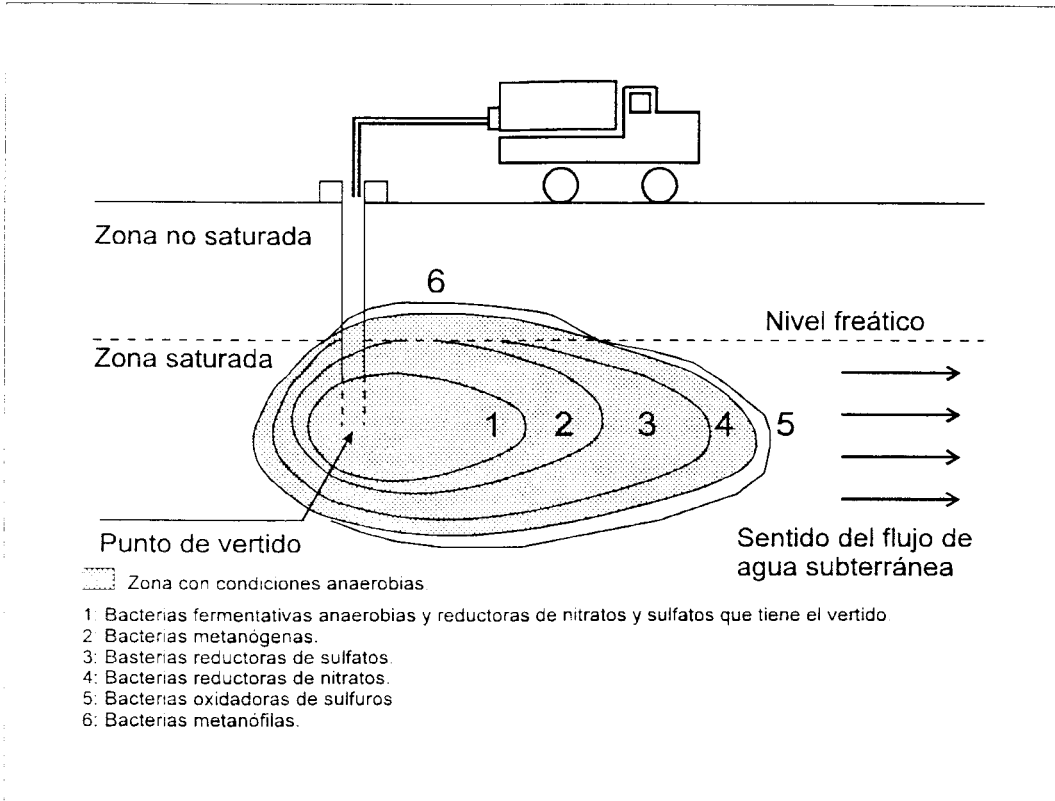
- Cuando se agoten los sulfatos (o se reduzcan a valores pequeños) predominarán las bacterias metanógenas, que reducen el CO_2 y los productos de degradación de las bacterias fermentativas en metano y agua. Este metano migrará verticalmente hasta el suelo, donde reinan condiciones aerobias y servirá de sustrato a las bacterias metófilas, que lo combinarán con el oxígeno para formar 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)