

***ANEXO II: Perdurabilidad de la contaminación
en el agua subterránea***

- ***Perdurabilidad de la contaminación bacteriológica***
- ***Perdurabilidad de la contaminación química***

ANEXO II

Perdurabilidad de la contaminación en el agua subterránea

El criterio más empleado para la definición de perímetros de protección es el tiempo de tránsito que, como ya se analizó, fundamenta su mecanismo de acción en asegurar que antes de llegar el contaminante a la captación pasará un tiempo suficiente para su degradación o inactivación. En este anexo se recogen tablas y datos, tomados de Moreno Merino *et al.*, 1991, que permiten conocer y cuantificar la dinámica de la mitigación de los contaminantes en el interior del acuífero.

Perdurabilidad de la contaminación bacteriológica

El origen de la contaminación bacteriológica del agua subterránea es muy heterogéneo, pudiendo considerarse:

- Industrias alimentarias (mataderos, fábricas de conservas, fábricas de embutidos, etc..).
- Explotaciones ganaderas.
- Industrias en general (vertidos de vinazas, procesamiento de grasas, etc..).
- Vertidos urbanos, líquidos (alcantarillado) y sólidos (vertederos incontrolados).

Los vertidos industriales en general producen un gran volumen de bacterias pero muy pocas especies son patógenas para el hombre, mientras que en los vertidos urbanos, además de su gran volumen está el factor añadido de presentar una enorme variedad de especies parásitas. En las tablas y figuras de este anexo se analizan en detalle las tasas de supervivencia de los parásitos más fácilmente encontrables en el agua subterránea.

Es preciso tener en cuenta que algunos de estos organismos encuentran en el medio hídrico una parte natural de su ciclo biológico, por lo que su permanencia en el agua será mucho mayor.

La cinética de degradación (eliminación en bacterias, inactivación en virus) sigue generalmente una ley exponencial del tipo:

$$C_t = C_0 \exp[-\lambda t(t - t_0)]$$

donde:

C_0 = Concentración inicial

C_t = Concentración a un tiempo t

λt = Constante de eliminación de bacterias o de inactivación de virus

$\lambda t = 0,693 / T$ siendo T el tiempo en el cual la mitad de bacterias o virus han desaparecido. T varía de 1 a 20 días para las bacterias y de 10 a 100 días para los virus.

A la vista de estos datos pudiera parecer que los tiempos de tránsito elegidos para dimensionar la zona próxima son excesivamente cortos, pero hay que considerar que los microorganismos no se encuentran simplemente en suspensión en el agua sino que también se van a producir fenómenos de interacción con el material que forma el acuífero como se analiza en las diversas tablas y figuras de este anexo.

Se indica a continuación la influencia que los factores medioambientales tienen en la supervivencia de los microorganismos.

Nutrientes

La ausencia de nutrientes actúa como factor limitante del desarrollo bacteriano, además en bacterias que compiten por un mismo nutriente, la de crecimiento más rápido suele desplazar al resto. En un estudio del IGME de 1990, *Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del norte de España*, se encuentra una correlación entre el contenido en bacterias y fósforo en el agua estudiada, no obteniendo sin embargo, relación alguna con el contenido en nitrógeno.

Tabla 70: Relación de microorganismos patógenos y de enfermedades infecciosas que producen, en los que el agua es principal (A) o circunstancial (B) vehículo de transmisión.

A	Agente	Enfermedad
Grupo		
Vía de entrada oral		
Virus	– Virus A de la hepatitis – Coxackie	– Hepatitis endémica – Afecciones gastrointestinales
Bacterias	– Salmonella typhi – Salmonella paratyphy – Shigella disenteriae – Vibrio cholerae	– Fiebre tifoidea – Fiebres paratíficas – Disentería bacilar – Cólera
Protozoos	– Entamoeba histolytica	– Disentería amebiana
Vía de entrada cutáneo-mucosa (contacto)		
Virus	– Adenovirus	– Conjuntivitis de las piscinas
Ritcketsiales	– Chlamydia oculo-genitalis	– Conjuntivitis de las piscinas
Gusanos (cercanías)	– Schistostomas – Fasciola hepática – Dracúncula medinensis	– Schistosomiasis en países tropicales – Distomatosis – Dracunculosis
B	Agente	Enfermedad
Grupo		
Vía de entrada oral		
Virus	– Poliomiélfíticos – Echovirus	– Parálisis – Afecciones diversas
Bacterias	– Pasturella tularensis – Leptospira – Escherichia coli enteropatógena	– Tularemia – Leptospirosis – Colitis recién nacidos
Protozoos	– Balantidium coli – Leishmanias – Giardia lamblia	– Balantidiasis – Leishmaniasis – Lambliasis
Gusanos	– Ascaris – Tenia equinococo	– Ascariidiasis – Hidatidosis
Vía de entrada cutáneo-mucosa		
Rickettsiales	– Chlamydozoom trachomatis	– Tracoma
Bacterias	– Bacillus anthracis – Brucellas – Leptospiras	– Carbunco – Fiebre de Malta – Afecciones icterohemorrágicas

Fuente: Cabo de la Fuente y Catalán, 1972 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 71: 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	O ₂	pH
Bacterias	Procariótica	<1-2-1-4 µm	Esférica Helicoidal Cilíndrica	Autótrofa y heterótrofa	0-20°C (psicrófilas) 25-40°C (mesófilas) 45-60°C (termófilas)	Con O ₂ libre (aeróbicas) Sin O ₂ libre (anaeróbicas) Con/sin O ₂ libre (anaeróbicas facultativas)	4-9 (óptimo: 6,5-7,5)
Hongos	Eucariótica	>5 µm diámetro	Filamentosa	Heterótrofa	0-62°C (óptimo: 22-30°C)	Anaerobios estrictos Aerobios	2-9 (óptimo: 5-6)
Algas	Eucariótica	Variables	Esférica Bacilar Alargada	Autótrofa	0-90°C	Aerobias	
	Procariótica	Como las bacterias					
Protozoos	Eucariótica	>5 µm diámetro	Variable	Autótrofa y heterótrofa	16-25°C	Aerobios y anaerobios	3-9 (óptimo: 6-8)
Virus	Molécula orgánica de ácido nucleico	15-50 nm	Poliédrica Helicoidal	Se reproducen por replicación. Permanecen en estado latente hasta que encuentran una célula huésped idónea para su reproducción			

Fuente: IGME, 1990 en Moreno Merino *et al.*, 1991**Tabla 72:** Valores medios de número de bacterias por gramo de heces humanas y animales.

Tipo de Bacteria	Hombre	Bovino	Ovino
Eschericia coli	1,3·10 ⁷	7,2·10 ⁵	8,9·10 ⁵
Streptococos fecales	8,1·10 ⁸	7,5·10 ⁵	6,5·10 ⁵
Streptococos bovis	58	3,8·10 ⁵	7,1·10 ⁵
Bifidobacterias	5,6·10 ⁹	0	0
Rhodococus coprophilus	0	2,1·10 ⁴	1,2·10 ⁴
Micromonospora	0	2,5·10 ⁴	1,2·10 ⁴
Streptomices	2,6·10 ³	9,1·10 ⁴	6,5·10 ⁴

Fuente: Mara y Oragui, 1985 en Moreno Merino *et al.*, 1991**Tabla 73:** Virus humanos susceptibles de ser encontrados en medio hídrico.

Familia	Género	Especie	Número de serótipos	Excreción		Cultivo sobre células	Envuelta
				Orina	Heces		
<i>Picomaviridae</i>	Enterovirus	Virus polio	3	✓	✓	✓	
		Virus Corsackle A	23	?	✓	✓	
		Virus Corsackle B	6	✓	✓	✓	
		Virus Echo	32	?	✓	✓	
		Enterovirus nuevos	4	✓	✓	✓	
		Virus de la Hepatitis A	1	✓	✓	-	
<i>Reovirida</i>	Reovirus	Retrovirus humanos	3	-	✓	✓	
	Rotavirus	Rotavirus humanos	3	-	✓	-	
<i>Adenoviridae</i>	Mastadenovirus	Adenovirus humanos	34	✓	✓	✓	
<i>Parvoviridae</i> o <i>Coliciviridae</i>	Parvovirus o Colicivirus	Agente de Norwalk	?	?	✓	-	
<i>Papoviridae</i>	Papillomavirus	Papillomavirus	15	-	-	-	

Fuente: Mathes *et al.*, 1988 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 74: 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 en Moreno Merino *et al.*, 1991

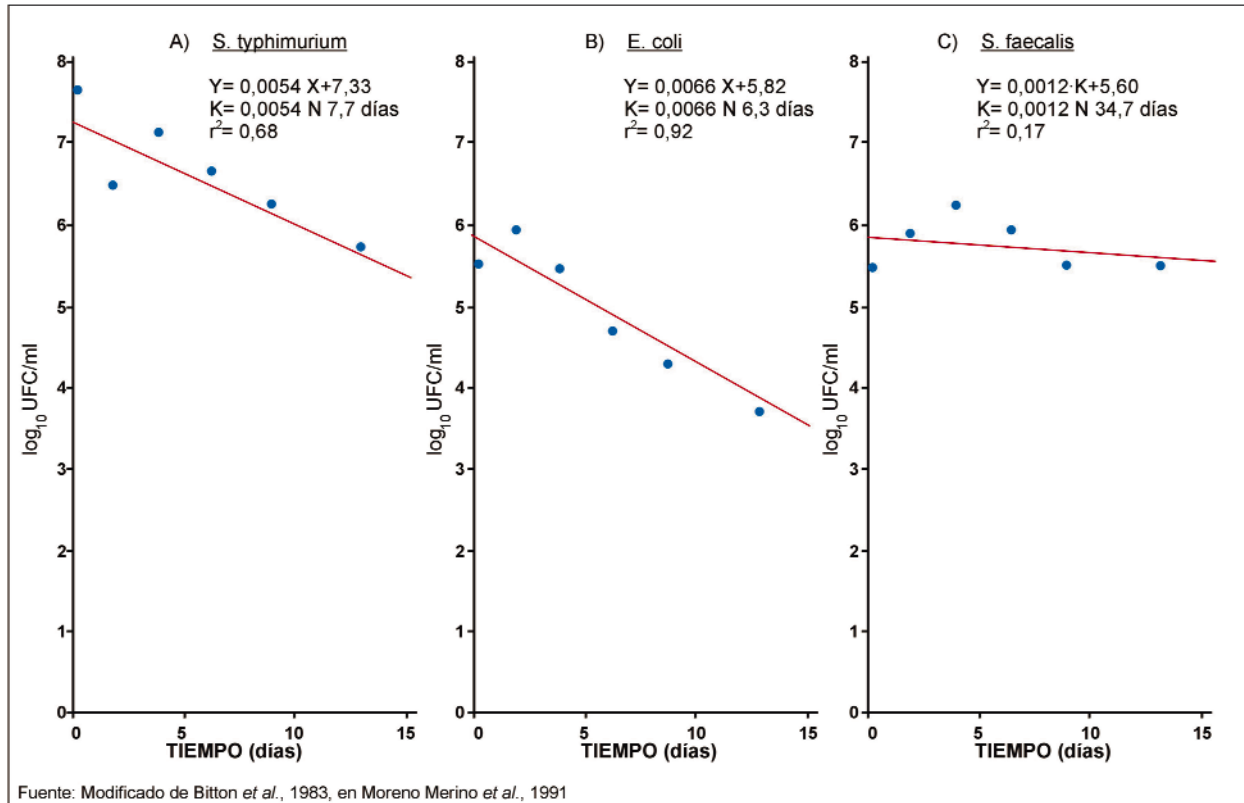


Figura 82: Supervivencia de varios tipos de bacterias (S. Typhimurium, S. Fecales y E. Coli) en aguas subterráneas (K es la velocidad de semidesaparición de los microorganismos).

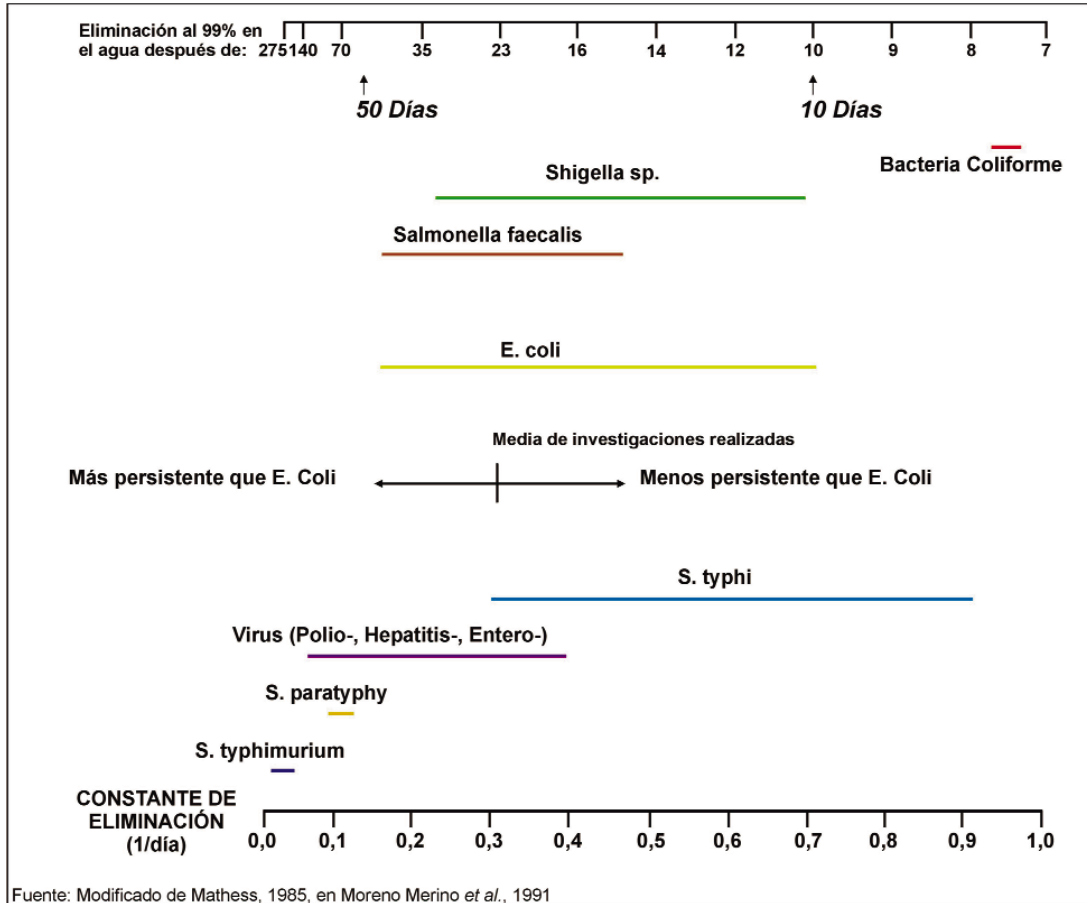


Figura 83: Constante de eliminación y eliminación al 99,9% de las principales bacterias y virus en el agua subterránea.

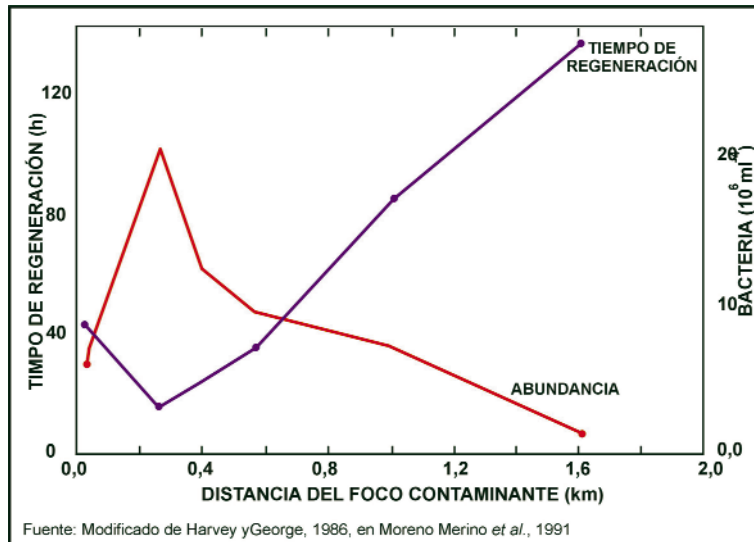


Figura 84: Variación del contenido en bacterias y de su tiempo de regeneración en las aguas subterráneas.

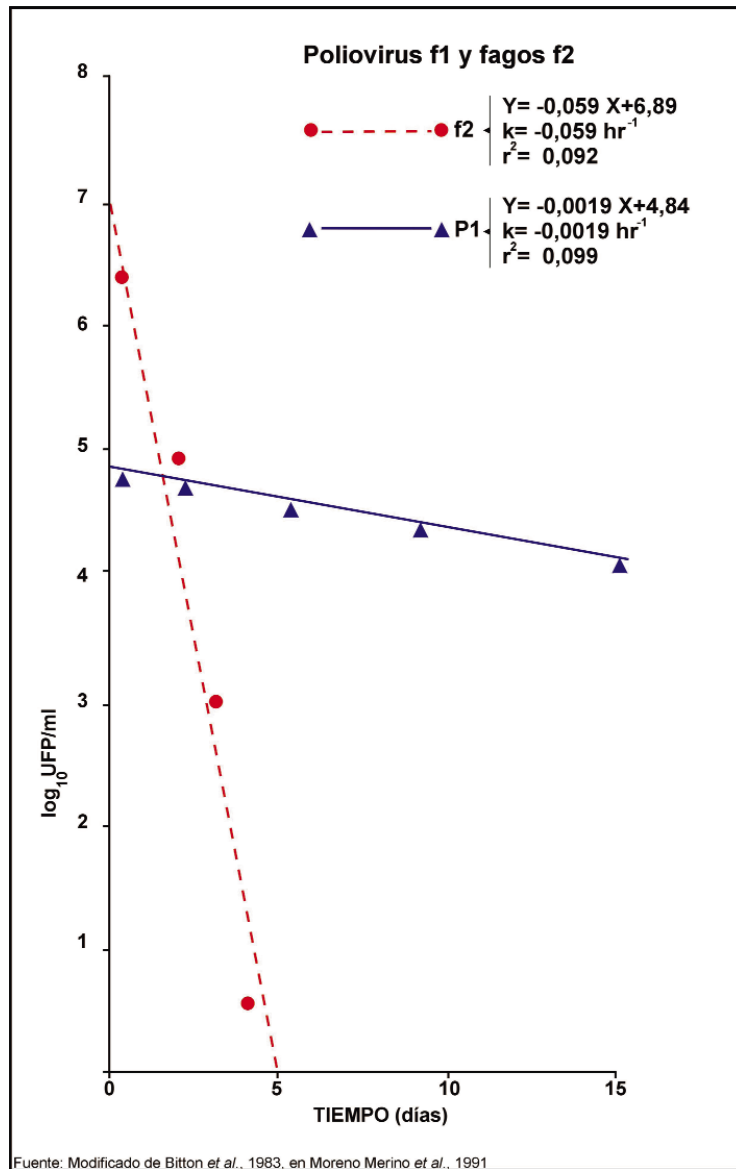


Figura 85: Supervivencia en aguas subterráneas de dos tipos de virus (Poliovirus 1 y bacteriofagos).

Temperatura

La temperatura influye de forma directa sobre la tasa metabólica bacteriana, aumentando ésta con la temperatura.

Temperatura (°C)	Tiempo de regeneración (horas)
0	18,4
6	7,0
12	2,7
25	0,77
30	0,69

Cada organismo tiene un margen de temperaturas en el cual es posible su vida y temperaturas superiores a estas son letales al causar daños irreparables en

su citoplasma. Las temperaturas por debajo del margen raramente causan la muerte de la bacteria pero provocan un estado "latente" en el cual no se multiplican.

Las bacterias parásitas del hombre encuentran en el agua subterránea un medio hostil, desapareciendo de forma más rápida al elevarse la temperatura, así los coliformes fecales desaparecen según una ley:

$$C = C_0 \cdot e^{-K \cdot T}$$

variando el factor K con la temperatura de acuerdo con la fórmula:

$$K = K_{20^\circ\text{C}} \cdot 1,047^{(T^\circ\text{C} - 20)}$$

Humedad

Las bacterias se encuentran mejor en terrenos con cierta capacidad para retener la humedad y la mayor parte mueren rápidamente con la desecación. No obstante existen especies que mediante la formación de esporas son capaces de resistir condiciones de desecación (V.G. Clostridium S.P.).

pH y potencial redox

La mayoría de las bacterias crecen sólo entre pH 4 y 9, aunque el óptimo está entre 6.5 y 8.5 que corresponde al rango de pH de las aguas naturales.

El potencial redox del agua y de los sedimentos tienen también una gran importancia ecológica requiriendo los grupos bacterianos muy diferentes condiciones de óxido-reducción. Así las bacterias aerobias requieren más altos valores de Eh que las anaerobias. La actividad bacteriana puede modificar el potencial redox del agua, por ejemplo al variar su contenido en oxígeno.

Luz

La luz solar tiene efectos inhibidores sobre bacterias no pigmentadas influyendo factores tales como la intensidad de la radiación y la turbidez del agua. Los efectos de la luz se ven modificados por otros factores como la temperatura.

Presión hidrostática

El gradiente de presión hidrostática es aproximadamente de una atmósfera cada 10 metros de profundidad. La mayor parte de las bacterias de suelos y aguas dulces no crecen a presiones superiores a doscientas atmósferas, aunque existen bacterias barófilas con óptimos cerca de las 500 atmósferas.

Experimentos realizados sobre E. Coli muestran que es capaz de sobrevivir perfectamente a sobrepresiones de 1.000 atmósferas. No obstante estas elevadas presiones provocan cambios morfológicos, disminución de la movilidad y modificación en la multiplicación al alterar las características del ADN.

Turbidez

La turbidez del agua puede deberse a varias causas:

- Partículas finas de origen mineral.
- Detritus constituidos por material inorgánico y orgánico.
- Microorganismos.

Las partículas orgánicas llevan una importante flora bacteriana y micótica en su superficie empleando la partícula como sustrato nutritivo. También las partículas minerales adsorben nutrientes en su superficie, encontrando allí los microorganismos un medio adecuado para su vida.

Puede constatarse que cuando un aumento de turbidez lleva parejo un aumento del número de bacterias se debe a materia orgánica en suspensión, si el aumento de turbidez no influye o lo hace de forma escasa sobre el número de bacterias se debe a materia inorgánica.

Materia inorgánica

La salinidad (es decir, la presión osmótica) influye de forma considerable en el tipo de microorganismos que pueblan el agua, existiendo óptimos en un amplio rango (desde bacterias halófilas estrictas, marinas, a bacterias de agua dulce que no soportan concentraciones mayores de un 1 %).

En general las bacterias de agua dulce viven en un rango óptimo de 10 a 50 gr de sales.

En vertidos urbanos y lagos contaminados se encuentran con frecuencia bacterias tolerantes a las sales (hasta 15-25%).

El amonio y nitrito juegan un papel importante en el suministro de energía a las bacterias nitrificantes, capaces de producir una desnitrificación bajo condiciones anaerobias.

Algunos metales pesados parecen tener un efecto bactericida (Cu, Hg, Ag, etc).

Gases

La mayoría de los microorganismos acuáticos son anaerobios facultativos (se adaptan a condiciones de presencia o ausencia de oxígeno) y según parece las fluctuaciones del contenido de oxígeno no afectan de forma considerable a la vida de bacterias aerobias obligatorias, que sólo se verán frenadas en su desarrollo por presiones parciales de oxígeno muy bajas. Sin embargo algunos organismos microaerófilos son inhibidos por concentraciones altas de oxígeno.

Existe un grupo de bacterias que emplean el metano como fuente de energía, mediante procesos de oxidación; otras emplean el SH, que es generalmente tóxico para el resto.

No debe olvidarse que las bacterias patógenas se encuentran en el suelo en un entorno extraño,

donde existe un fuerte competencia con las pobladoras naturales de este medio, por ello la permanencia es mayor por ejemplo es suelos previamente esterilizados.

Al discurrir por el acuífero se producen fenómenos de filtración que pueden llegar a eliminar totalmente los contaminantes biológicos, (especialmente en el caso de helmintos que son de mayor tamaño, pero también bacterias y hongos). En la figura 86 se comparan los tamaños de bacterias, protozoos y hongos con el tamaño de grano de los materiales del acuífero.

Los factores que afectan a la infiltración y movimiento de las bacterias en el suelo pueden resumirse en:

A) Características físicas del suelo

1. Textura
2. Distribución del tamaño de partículas
3. Tipo y contenido en arcillas
4. Tipo y contenido de materia orgánica
5. Capacidad de intercambio catiónico
6. Distribución del tamaño de poro

B) Factores químicos y ambientales del suelo

1. Temperatura
2. Contenido de humedad
3. Flujo de agua en el suelo
4. Tipo y concentración de iones en la solución del suelo
5. pH y potencial redox
6. Densidad y dimensiones de las bacterias
7. Naturaleza de la materia orgánica
8. Competencia con la microflora natural del suelo

La cofloculación de las bacterias con materia coloidal también puede aumentar la velocidad de filtración y sedimentación.

Estudios realizados sobre el movimiento de bacterias en acuíferos contaminados ponen de manifiesto que dicho movimiento responde a un modelo de transporte coloidal. Bajo ciertas condiciones la movilidad de algunas bacterias puede aproximarse a la de un trazador conservativo, aunque influirán también factores tales como adsorción, filtración, muerte y competencia con otros organismos.

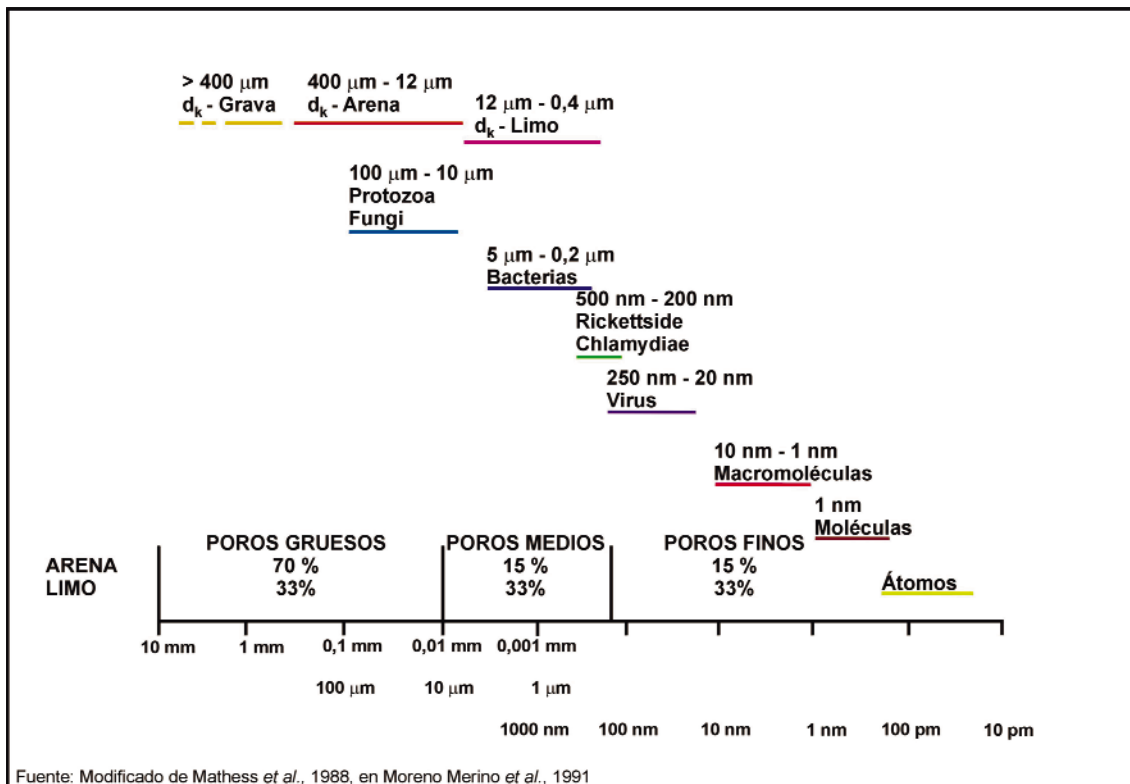


Figura 86: Comparación y tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes.

En la tabla 75 están recogidos los factores que influyen con mayor peso en el movimiento y supervivencia de estos microorganismos.

La dispersión es un mecanismo especialmente importante en la alteración del número de bacterias.

Los virus son fuertemente adsorbidos sobre materiales coloidales (menos sobre arenas), aumentando la adsorción al disminuir el pH. El contenido en cationes disminuye la movilidad de los virus.

Los virus así retenidos lo son de modo reversible de forma que una variación del pH, una fuerte lluvia etc., pueden removerlos provocando episodios de fuerte incremento en su concentración no relacionados con un hecho contaminante concreto.

Un elevado contenido en materia orgánica aumenta la permanencia de microorganismos en el agua, incluso puede permitir su reproducción. Así las bacterias, por ejemplo, no suelen encontrarse libres en el agua sino que suelen estar agrupadas alrededor de materia orgánica en suspensión que les sirve como sustrato.

La presencia de ciertos contaminantes, como metales pesados (que impiden el desarrollo bacteriano), detergentes (que provocan la inactivación de virus), entre otros, también deberá ser tenida en cuenta.

En las tablas 76 a 78 y figuras 87 a 89 se cuantifica la importancia de alguno de los factores estudiados.

La figura 87 es especialmente importante, en ella se muestra como la distancia que las bacterias pueden recorrer es muy variable y está directamente relacionada con el tipo de materiales.

En el caso de acuíferos kárstico o fisurados donde se produce una rápida circulación del agua, la mayor parte de los fenómenos depuradores anteriormente citados no existen o se dan de forma atenuada, no existe apenas filtración, el tiempo de tránsito es mucho menor impidiendo que de tiempo a la actuación de otros factores. En estos acuíferos se observa como el contenido en bacterias en el agua subterránea se encuentra estrechamente ligado a la turbidez, debido a que las características del flujo del agua influyen considerablemente en los procesos de sedimentación-movilización; así puede verse, como tras una fuerte lluvia aumentan considerablemente las bacterias en agua (arrastré desde superficie mas remoción de las sedimentadas en los huecos o fracturas), incluso fuertes bombeos tienen este efecto.

A este respecto estudios realizados en el IGME muestran como la velocidad de percolación influye notablemente sobre el contenido de microorganismos en el agua, debido sin duda a que una mayor velocidad implica una mayor facilidad para mover

Tabla 75: Factores que afectan al movimiento y supervivencia de los virus en el suelo.

Movimiento de los virus	
Factor	Efecto
Tipo de suelo	Los de textura fina retienen mejor a los virus Los óxidos de hierro aumentan la adsorción
pH	La adsorción aumenta cuando el pH disminuye
Cationes	La adsorción aumenta en presencia de cationes
Sustancias orgánicas	Compiten con los virus en la adsorción
Tipos de virus	La adsorción varía con el tipo de virus
Velocidad de flujo	A mayor velocidad menor adsorción del virus al suelo
Flujo no saturado/flujo saturado	Los virus se mueven menos en flujo no saturado
Supervivencia de los virus	
Factor	Efecto
Temperatura	Las altas temperaturas son perjudiciales
Desecación	Los virus se reducen más en suelos secos
Luz solar	Perjudicial en la superficie
Controla la adsorción de los virus al suelo	Controla la adsorción de los virus al suelo
Cationes	Contribuyen a estabilizar los virus en el suelo
Textura del suelo	Las arcillas y sustancias húmicas aumentan la retención de los virus
Factores biológicos	No hay una tendencia clara

Fuente: Bitton y Gerba, 1984 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 76: Constantes de inactivación de virus en aguas subterráneas a $10 \pm 1^\circ\text{C}$ 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
Agua subterránea desionizada	0,0401	0,0324	0,0382	0,0322
Agua subterránea en autoclave	0,0123	0,0189	0,03220	0,0103
Agua subterránea en autoclave + arena gruesa	0,00927	0,0301	0,0123	0,0163
Agua subterránea en autoclave + arena media	0,0146	0,0311	0,0175	0,0276
Agua subterránea en autoclave + arena fina	0,0084		0,0157	0,0177

Fuente: Matthes, 1985 en Moreno Merino *et al.*, 1991

bacterias que de otra forma permanecerían sedimentadas.

En conclusión puede decirse que la zona próxima o de restricciones máximas permite (cuando es diseñada según criterios de tiempo de tránsito) una depu-

ración adecuada del agua dando un valor a este criterio de 50 días, pues no sólo se depura por la cinética normal de eliminación o inactivación, sino que también intervienen otros factores. Los medios kársticos o fisurados suponen un problema especial por sus características cinéticas.

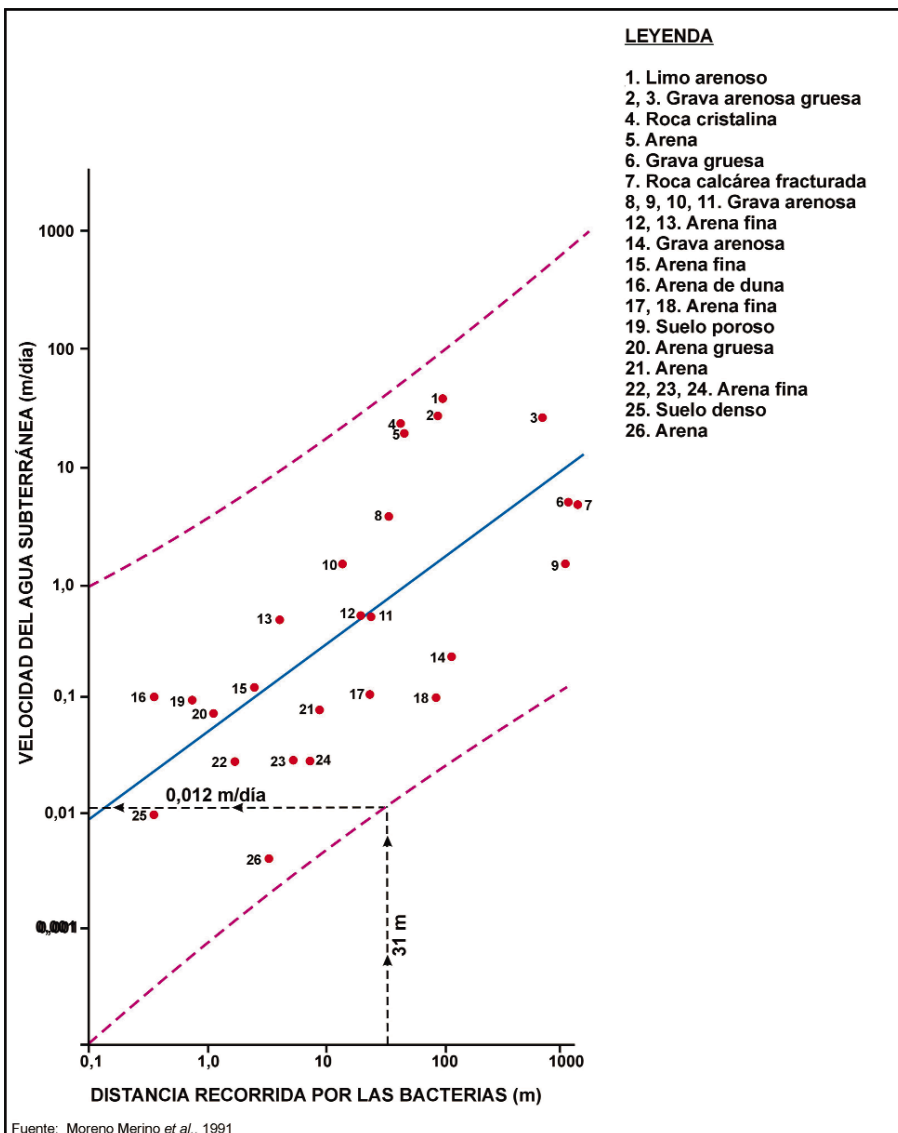


Figura 87: Distancia recorrida por las bacterias en medio saturado.

Perdurabilidad de la contaminación química

La contaminación química, al igual que la biológica, se ve afectada al atravesar el acuífero por procesos capaces de modificar, tanto su concentración inicial, como su naturaleza. En la tabla 79 se resumen para varias sustancias, cuya presencia es frecuente en el agua subterránea, los valores de permanencia. En alguna de ellas, la vida media es muy elevada, así por

ejemplo, el pesticida DBCP perdura 10 semanas en la zona no saturada, aumentando a varias decenas de años en la saturada.

La movilidad de los diferentes contaminantes químicos depende básicamente de su naturaleza y condiciones del medio que les rodea. Por su importancia se analizan tres casos:

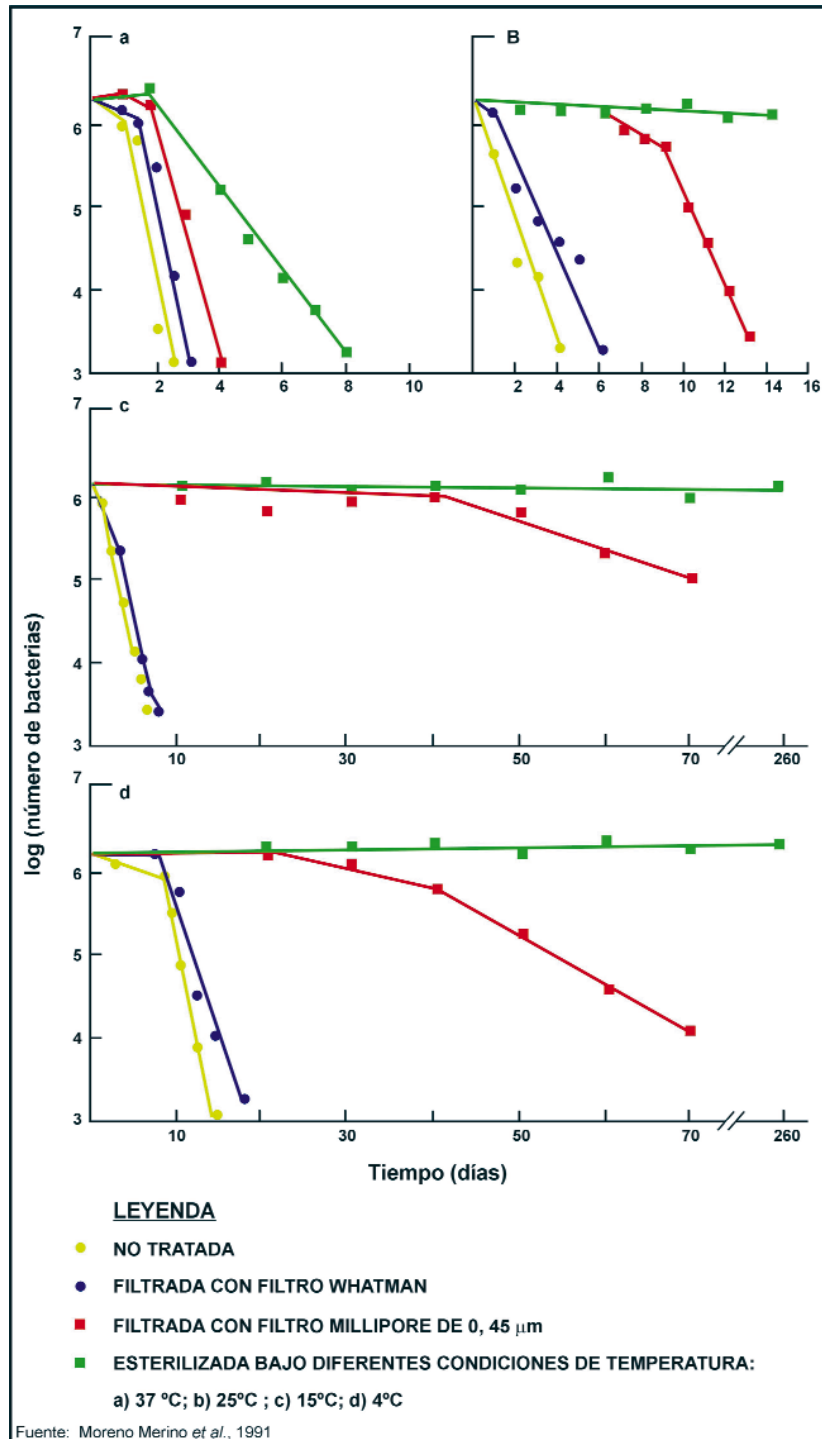


Figura 88: Supervivencia de Escherichia Coli en agua de río.

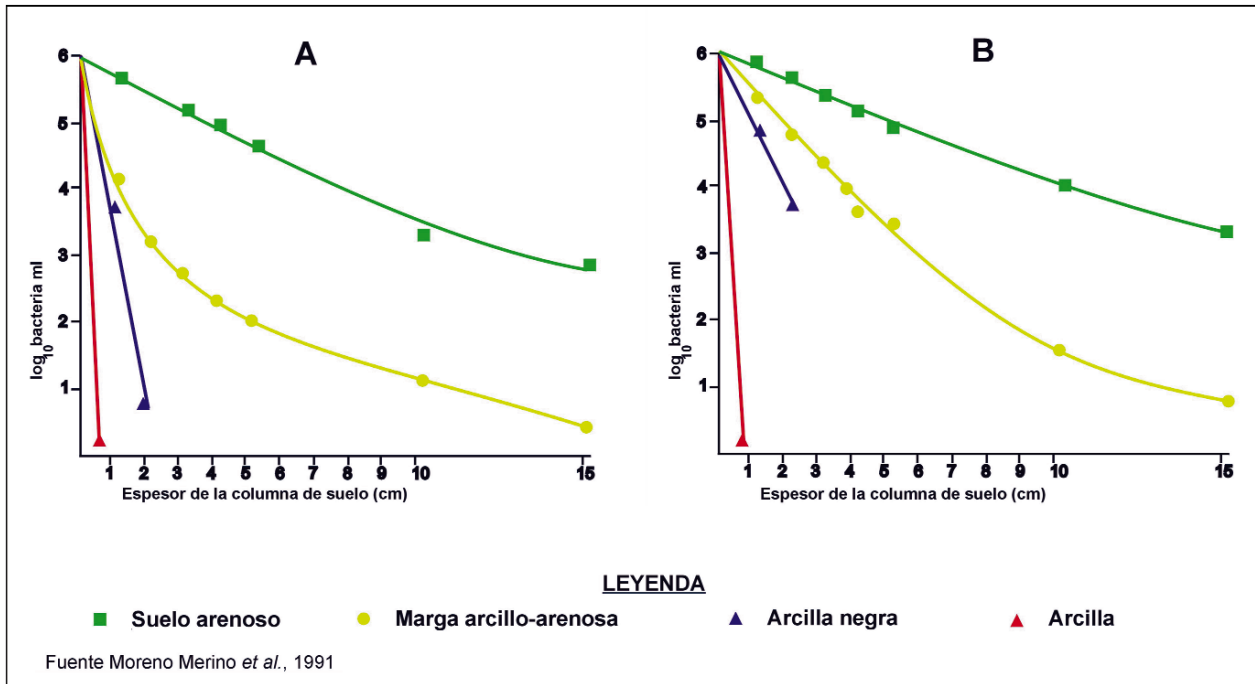


Figura 89: Disminución en el número de bacterias (*Escherichia Coli* (A) y *Streptococcus fecales* (B)) con la profundidad en suelos arenosos.

Tabla 77: 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 ²)	% adsorción Poliovirus Vaccinal	
				Media	Mínima
Tierra arcillosa	7,6	16	1,1	75	43
Turba	7,2	200	14	79	16
Óxido 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 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 78: Influencia del tipo de virus, profundidad de infiltración de enterovirus en una columna de arena 1% 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	7,90
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	0,14
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: Moreno Merino *et al.*, 1991

Metales pesados: Su mayor o menor movilidad va a depender de los aniones presentes en el medio con los que combinarán formando compuestos más o menos solubles (carbonatos, sulfatos, hidróxidos, cloruros, sulfuros, etc). También forman complejos con los ácidos húmicos quedando retenidos de forma irreversible.

Las arcillas, hidróxidos y ácidos húmicos pueden retener metales mediante procesos de adsorción y de intercambio iónico, procesos estos que presentan una cierta selectividad:

Los hidróxidos de hierro fijan preferentemente: Zn, Cu, Pb, Hg, Cr.

Los hidróxidos de aluminio: Cu, Ni, Co, Cr, Mo.

Las arcillas: Zn, Cu, Pb y Hg.

A su vez estos metales pueden ser desorbidos por otros iones competidores.

Variaciones en T, pH, Eh, etc, influyen notablemente en la dinámica de estos procesos.

Todos estos fenómenos tienen como resultado un doble efecto, por un lado los metales son retenidos de forma que su concentración disminuye en el agua subterránea, por otro cuando se trata de fenómenos reversibles se produce un retardo en el paso del contaminante a través del acuífero, viajando a menor velocidad que el agua.

Hidrocarburos: Su origen es muy diverso, pero prácticamente siempre ligado a actividades urbanas o

industriales. En un primer momento y antes de infiltrarse en el terreno se pierden gran parte de sus compuestos volátiles, siendo posteriormente la dilución (en pequeña medida) y principalmente la degradación bacteriana, los responsables de su desaparición.

El movimiento de estas sustancias en el subsuelo va a estar muy ligado a su viscosidad (frecuentemente elevada), su miscibilidad con el agua (generalmente muy baja) y la forma en que fueron vertidas (en especial cuando se vierten como emulsión en agua lo que facilita su transporte).

Como generalmente son menos densas que el agua se sitúan sobre la superficie de ésta, extendiéndose posteriormente; variaciones en el nivel piezométrico tienen como efecto que puedan llegar a lugares bastante profundos de la zona saturada.

Plaguicidas: En el transporte tendrá vital importancia su solubilidad en agua (Tabla 80) siendo más rápidamente transportados aquellos cuya solubilidad sea elevada. Los fenómenos de adsorción pueden llegar a retener algunos de forma completa, pero será la degradación bacteriana al factor predominante en su eliminación. La degradación del pesticida no siempre conduce a un compuesto menos tóxico, al contrario, es frecuente que se produzcan activaciones que dan lugar a productos más peligrosos que la sustancia madre.

En la tabla 80 se ven los procesos químicos que sufren en el suelo los principales elementos implicados en procesos contaminantes.

Tabla 79: Persistencia de sustancias orgánicas en el suelo y en el agua subterránea.

Sustancias orgánicas	Vida media estimada (años)	
	En el agua subterránea	En los suelos
<i>Hidrocarburos</i>		
Benceno		1
Tolueno		0,3
Xileno		0,3
Etilbenceno		0,3
C ₃ Benceno		0,6
Naftaleno		0,6
<i>Hidrocarburos halogenados</i>		
Diclorometano		10
Triclorometano		2
1,1,1, Triclorometano		1
Diclorobenceno		1
<i>Pesticidas* (Baja solubilidad en agua)</i>		
Clorano		2 a 4
DDT		3 a 10
Dieldrin		1 a 7
Heptacloro		7 a 12
Toxafeno		10
DDVP		0,047 (17 días)
Metil demeton S		0,071 (26 días)
Thimet		0,005 (2 días)
<i>Pesticidas** (Alta solubilidad en agua)</i>		
EDB	5,8	0,04-0,35 (2-18 semanas)
DBPC	28,5 a 140	0,2 (10 semanas)
Aldicarb	0,2 a 12, 5	0,08-0,15 (4-8 semanas)
Atrazina	0,2 a 2	0,08-11(4-57 semanas)
Carbofurano	0 a 1	0,02-0,7 (1-37 semanas)

Fuente: * Matthes, 1985 en Moreno Merino *et al.*, 1991** Cohen, *et al.*, 1986 en Moreno Merino *et al.*, 1991

Tabla 80: Componentes y procesos químicos del suelo.

Elemento	Símbolo	Soluto	Cambio iónico		Proceso químico en el suelo				
			Catiónico	Aniónico	Redox		Precipitados insolubles más comunes	Adsorción específica	Complejos insolubles orgánicos
					Forma oxidada	Forma reducida			
GRUPO PRIMERO									
Litio	Li	Li ⁺	O-I				Ninguno	No	No
Sodio	Na	Na ⁺	O-I				Ninguno	No	No
Nitrógeno	N	NH ₄ ⁺	O-I		NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	N ₂ O, N ₂	Ninguno	M, I, V (m)	No
Potasio	K	K ⁺	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Rubidio	Rb	Rb ⁺	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Cesio	Cs	Cs ⁺	O-I				Ninguno	M, I, V (m)	No
Magnesio	Mg	Mg ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
Calcio	Ca	Ca ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
Estroncio	Sr	Sr ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
Bario	Ba	Ba ⁺⁺	O-I				P, C, Sf	No	d
GRUPO SEGUNDO									
Cloruro	Cl	Cl ⁻		O-I				No	No
Nitrógeno	N	CN ⁻		O-I			Ninguno	No	No
Nitrógeno	N	NO ₃ ⁻		O-I		NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , N ₂ O, N ₂	Ninguno	No	No
Azufre	S	SO ₄ ²⁻		O-I		S, S ₂ , S ₂ ²⁻ , SO ₂ ²⁻	Cationes divalentes	Hf (d)	No
Selenio	Se	SeO ₃ ²⁻		O-I	SeO ₄ ⁺		Cationes divalentes, Fe ³⁺	Hf (d)	No
GRUPO TERCERO									
Flúor	F	F ⁻		O-I			CaF ₂	Hf, Ha (i)	No
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻		O-I			(Fe, Al, Ca)P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Fósforo	P	Poli-P, Meta-P		O-I				Ma, Hf, Ha (i)	No
Arsénico	As	H ₂ AsO ₄ ²⁻		O-I			Coppta, con (Fe, Al, Ca)P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Sílice	Si	Si(OH) ₄		O-I			(Fe, Al, SiO ₂)		No
Molibdeno	Mo	Mo ₄ ²⁻		O-I			Coppta, con (Fe, Al, Ca)P	Ma, Hf, Ha (i)	No
Boro	B	B(OH) ₃						Hf, Ha (d)	No
Carbón	C						CaCO ₃ , MgCO ₃		No
GRUPO CUARTO									
Aluminio	Al	Al ⁺³ , Al(OH) ⁺⁺	O-I				H, P		m
Berilio	Be	Be(OH) ⁺	O-I				H		
Vanadio	V	VO ₂	O-I				H		
GRUPO QUINTO									
Hierro	Fe	Fe ⁺³	O-I			Fe ⁺⁺	H, P, C, Sf, Sr	Ma, O (i)	i
Manganeso	Mn	Mn ⁺⁴	O-I			Mn ⁺⁺	H, Sr	Ma, O (i)	m
GRUPO SEXTO									
Plata	Ag	Ag ⁺	O-I				Ag, Cl, Sr	I-O (i)	i
Plomo	Pb	Pb ⁺⁺	O-I				H, Sf, C, Sr	I-O (i)	i
Mercurio	Hg	Hg ⁺⁺	O-I				HgO, Sr	I-O (i)	i
Cadmio	Cd	Cd ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cinc	Zn	Zn ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cobre	Cu	Cu ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Níquel	Ni	Ni ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cobalto	Co	Co ⁺⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
Cromo	Cr	Cr ³⁺	O-I				Coppt (Fe, Al), H	I-O (i)	i
GRUPO SÉPTIMO									
Orgánico no descompuesto						Sí		I (i)	
Orgánico macromoléculas						Sí			
Orgánico no polar						Sí			
Orgánico polar						Sí		I (d)	
Orgánico catiónico			O-I			Sí		I (i)	
Orgánico aniónico				O-I		Sí		I-O	
Orgánico quelatos metálicos						Sí			

ABREVIATURAS:

I: Componentes inorgánicos del terreno	d: interacción débil	C: carbonato	M: mica	Ma: minerales arcillosos
O: Componentes orgánicos del terreno	m: interacción moderada	Sf: sulfato	I: illita	Ha: hidróxido de aluminio
	i: interacción intensa	Sr: sulfuro	V: vermiculita	Hf: hidróxido de hierro
	P: fosfato	H: hidróxido	Mt: montmorillonita	

Fuente: FAO, 1975 en Moreno Merino *et al.*, 1991