

CAPÍTULO 21

COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES DE CONTAMINACIÓN FECAL EN LOS DIFERENTES SISTEMAS DE DESINFECCIÓN

Resumen

El principal objetivo de los sistemas de desinfección es la eliminación de microorganismos patógenos. El diagnóstico de estos microorganismos requiere en la mayoría de los casos laboratorios especializados, varios días de análisis y costos elevados. La alternativa para realizar un control fiable, económico y rápido de la calidad microbiológica del agua es el uso de indicadores de contaminación fecal. Estos microorganismos se identifican y cuantifican mediante técnicas fáciles rápidas y económicas. En la actualidad se trabaja con diferentes microorganismos representantes de los patógenos de origen fecal. Los principales patógenos y sus correspondientes indicadores son los siguientes: bacterias (coliformes fecales, E.coli, Streptococcus fecales y Clostridium perfringens), virus (fagos somáticos, F+ y de Bacteroides fragilis), Huevos de helminto (Ascaris lumbricoides) y quistes (Giardia y Cryptosporidium). El comportamiento de estos indicadores frente a barreras naturales como artificiales puede variar. Esta trabajo pretende mostrar el comportamiento de algunos de estos indicadores en sistemas de desinfección naturales y artificiales.

Palabras Clave: Barreras naturales, barreras artificiales, desinfección, indicadores..

La exposición a agentes infecciosos y compuestos químicos, por la ingestión del agua, directa o indirectamente, alteran el bienestar de cualquier sociedad, dado que la calidad de vida está estrechamente relacionadas con la calidad del agua. Por otro lado el incremento en la contaminación (biológica y química) de las fuentes de aguas se relaciona con el marcado desequilibrio entre la oferta y la demanda, producto del crecimiento de la población.

Las infecciones transmitidas por aguas contaminadas microbiológicamente se producen por bacterias, virus y parásitos, los cuales son eliminados al agua a través de las heces de animales o individuos contaminados. Es por esto, que las aguas son el principal foco dispersor de patógenos en ambientes acuáticos.

La vía más común de contaminación por microorganismos para el hombre es la oral; de allí pasan al tracto gastrointestinal donde completan su ciclo de infección, para ser luego eliminadas a través de las heces. Una vez llegan al agua, los patógenos se enfrentan a barreras de tipo natural y artificial que producen su eliminación parcial o total. Estas barreras varían en intensidad y duración e incluyen tratamientos tanto primarios, secundarios como terciarios.

Las barreras artificiales imitan en algunas ocasiones, procesos desarrollados por la naturaleza, la cual tiende a restablecer el equilibrio de los sistemas acuáticos imponiendo barreras naturales. De esta manera la carga microbiológica contaminante de un sistema acuático superficial o subterráneo también experimenta inactivación de tipo natural a través de los fenómenos de autodepuración (Durán, 2002).

A continuación se analizará el comportamiento de los indicadores de contaminación fecal en el recorrido desde su llegada a un cuerpo de agua, pasando por los sistemas de depuración y potabilización hasta su uso ya sea como agua de bebida o para otro tipo de usos como el riego agrícola.

Aguas residuales

Las aguas residuales están constituidas por una gran cantidad de compuestos de diversa naturaleza. Uno de los principales constituyentes son las heces fecales que pueden variar en volumen y composición. Estos dependen de la dieta, el clima y el estado sanitario de la población. La tabla I muestra la concentración promedio de los indicadores bacterianos, virales y parasitarios en aguas residuales.

Tabla I. Concentración promedio de los indicadores de contaminación fecal en aguas residuales. INCO 2001.

CF	EC	ENT	CP	SOM	F+	RYC	GIA	CRY
6,99	7,27	6,07	5,44	6,35	5,58	4,26	3,03	2,55

Los resultados están expresados como log₁₀ de UFC o PFP/ 100 ml.

CF: coliformes fecales, EC: *E. coli*, ENT: enterococos, CP: *Clostridium perfringens*, SOM: fagos somáticos, F+: fagos F+, RYC: fagos de *Bacteroides fragilis*, GIA: *Giardia spp*, CRY: *Cryptosporidium spp*.

El orden de prevalencia en los indicadores microbiológicos es el siguiente:

EC>CF>SOM>ENT>CP>RYC

Depuración de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales tiene como objetivo la transformación de la materia orgánica en material inorgánico y la reducción o eliminación de organismos patógenos, de transmisión hídrica. Este proceso se denomina de estabilización o mineralización, y su consecuencia inmediata es la disminución de la DBO₅ y de los microorganismos patógenos.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen como base procesos físicos, químicos y biológicos que reproducen en corto tiempo, y en un espacio reducido, las etapas que ocurren en los procesos naturales de autodepuración de los sistemas acuáticos. El conjunto de estos procesos sucede en el interior de reactores, generalmente en serie que constituyen los procesos unitarios de tratamiento de las aguas residuales. De forma resumida puede lograrse la muerte o eliminación de los organismos patógenos mediante tres procesos fundamentales:

- Por la creación de condiciones adversas extremas, como sucede en la digestión termofílica, que promueve una muerte rápida.
- Por la permanencia prolongada de los organismos dentro del reactor (tiempos largos de retención hidráulica), que favorecen la muerte natural, como se verifica en las lagunas de estabilización.
- Por la aceleración de las tasas metabólicas y estimulación de las cadenas alimentarias como ocurre en los lodos activados, donde la oxigenación apropiada y la relación alimento/microorganismo estimula el consumo rápido de la materia orgánica.

Los diferentes tipos de tratamiento producen efluentes y lodos de diferentes calidades y cantidades, con gran variación de tipos y concentraciones de organismos patógenos.

Los efluentes de lagunas de estabilización por ejemplo, tienen bacterias y virus, pero pueden no tener huevos de helminto, ya que éstos se sedimentan por su propio peso en el fondo de las lagunas, debido al prolongado tiempo de permanencia en el sistema.

Por el contrario, en la digestión termofílica, en el material residual de las fosas sépticas y en los lechos de secado de lodos, los virus y las bacterias son destruidos con más facilidad que los huevos de helminto.

Los procesos de depuración biológica de aguas residuales incluyen varias fases, que incluyen en términos generales, tratamiento primario, secundario y terciario. El tratamiento primario busca la sedimentación de sólidos, el secundario la eliminación de materia orgánica mediante degradación biológica y el terciario la desinfección.

Dentro de los sistemas secundarios los más representativos son los lodos activados y las lagunas de estabilización. En el caso de los lodos activados la eliminación de patógenos es muy baja, mientras que en los sistemas de lagunaje se alcanzan elevados porcentajes de eliminación. A continuación se discutirá acerca de los factores que influyen en la eliminación de microorganismos en los sistemas de lagunaje.

Las lagunas de estabilización son un método económico y eficiente de tratamiento de las aguas residuales, especialmente en regiones donde hay suficiente tierra disponible y a bajo precio.

En los países de climas tropicales las lagunas de estabilización funcionan naturalmente a la temperatura ambiente. Según el tipo de proyecto, puede conseguirse la eliminación total de patógenos. Existen varios tipos de lagunas de estabilización: anaerobias, facultativas, de maduración, de alta tasa, etc.

En las lagunas anaerobias, el principal mecanismo de eliminación de microorganismos es la sedimentación. Los huevos de helminto se decantan por su propio peso, y los virus, bacterias y protozoos se sedimentan adheridos o absorbidos por sólidos decantables, o son arrastrados por éstos durante la sedimentación. Una vez en el lodo, las condiciones anaerobias de descomposición de la materia orgánica y la acción de los predadores causan la muerte de estos microorganismos. Sin embargo, su eliminación es poco eficiente y depende del tiempo de permanencia. En general, las bacterias disminuyen una unidad logarítmica, un poco más en el caso de virus y protozoos y los huevos de helminto muy poco.

En las lagunas facultativas, así llamadas por presentar condiciones aerobias en las capas superiores y anaeróbicas en las más profundas, la eliminación y la muerte de los microorganismos indicadores y patógeno son más complejas. Numerosos factores influyen en el proceso:

- Sedimentación
- Radicación solar
- pH elevado
- Bajos niveles de CO₂
- Altas concentraciones de O₂ disuelto
- Acción bactericida de toxinas producidas por algas
- Presencia de predadores
- Tiempo de retención hidráulica

Los altos valores de pH y de oxígeno molecular presentes en las lagunas de estabilización en las horas más iluminadas del día son el producto de la actividad fotosintética de las algas.

Se ha propuesto que las radiaciones luminosas de longitud de onda superiores a 320µm, en presencia de altas concentraciones de oxígeno, y bajas de CO₂, tienen efecto letal sobre los microorganismos. En el caso de que se presente pH elevado, la acción inhibitoria estaría asociada a la ionización de la membrana celular y a alteraciones del pH intracelular, lo que dificultaría o anularía el metabolismo bacteriano.

Una u otra causa del debilitamiento y de la muerte de bacterias inhibidoras y patógenas en las lagunas de estabilización estarían relacionadas con bajas concentraciones de nutrientes, que ocurren a medida que avanza el tratamiento de las aguas residuales, y debido a las transformaciones físico-químicas y biológicas como la disminución de ortofosfato soluble, por precipitación a pH básico > 9, o por ser consumidas por las algas y las macrófitas.

Los mayores efectos bactericidas se observan en las lagunas de maduración, donde la transparencia del agua llega hasta el fondo, permitiendo la completa penetración de la luz solar. En ellas se observan los efectos sinérgicos de la luz y de los factores generados por las altas tasas fotosintéticas (elevada producción de O₂, altos valores de pH, presencia de toxinas, escasez de nutrientes).

La mayoría de los efectos tóxicos para los microorganismos ocurren en las horas diurnas cuando las lagunas están sometidas a una fuerte radiación solar, que en los trópicos tiene duración aproximada de 12 horas. Durante la noche se observa menor o ninguna eliminación de bacterias indicadoras de contaminación fecal. Por el contrario, hasta pueden ocurrir aumentos de coliformes fecales y patógenos, debido a la mezcla completa de la masa de agua, por la pérdida de estratificación térmica, con resuspensión de material del fondo.

El tiempo de retención hidráulica es, sin duda, un factor decisivo, que puede determinar la eficiencia del sistema. Tiempos cortos no permiten la acción sinérgica del sistema algas/bacterias, pues no posibilitan la acción de una biomasa significativa de algas. Tiempos muy prolongados pueden producir el crecimiento exagerado del fitoplancton que forma una densa capa verde superficial. Esta capa causa el ensombrecimiento de las capas inferiores del agua, causando la inhibición de la fotosíntesis, la producción de oxígeno, la elevación del pH, etc., es decir se produce la ruptura de las interrelaciones algas/bacterias y pueden aparecer condiciones anaerobias durante el día, disminuyendo la eficiencia en la eliminación de patógenos (Rolim, 2000, Campos, 2002).

A continuación (Tabla II), se muestran la reducción en unidades logarítmicas de los indicadores de contaminación fecal en diferentes sistemas de tratamiento.

Tabla II. Reducción en UL de indicadores de contaminación fecal en diferentes sistemas de tratamiento. INCO 2001.

Sistema	CF	ENT	CP	SOM	F+	RYC	GIA	CRY
Sedimentación primaria	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.7	-
Lodos activados	1.6	1.4	1.0	1.5	1.6	1.4	1.5	1.1
Lagunas de Estabilización	3.0	2.6	1,5	2.4	2.3	1.3	2.0	2.0
Filtros de arena	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	-	-
Filtros de anillos	0.2	<0.1	<0.1	0.3	0.5	0.3	-	-

Los resultados están expresados como log₁₀ de UFC o PFP/ 100 ml.

CF: coliformes fecales, EC: *E.coli*, ENT: enterococos, CP: *Clostridium perfringens*, SOM: fagos somáticos, F+: fagos F+, RYC: fagos de *Bacteroides fragilis*, GIA: *Giardia spp*, CRY: *Cryptosporidium spp*.

Estudios realizados por Duran (2001) en un sistema de lagunaje en Cataluña, el cual fue evaluado en diferentes épocas del año, muestran una clara diferencia en la reducción de la mayoría de los microorganismos indicadores dependiendo de la época del año. Los resultados se observan en la Tabla III.

Tabla III. Reducción en UL de los indicadores de contaminación fecal en dos sistemas de lagunaje evaluados en época de verano e invierno.

Época	CF	ENT	CP	SOM	F+	RYC
Invierno	2.18	2.60	2.27	2.50	1.91	1.20
Verano	4.78	2.11	1.14	3.98	3.49	1.12

Los resultados están expresados como log₁₀ de UFC o PFP/ 100 ml.

CF: coliformes fecales, EC: *E.coli*, ENT: enterococos, CP: *Clostridium perfringens*, SOM: fagos somáticos, F+: fagos F+, RYC: fagos de *Bacteroides fragilis*.

Procesos de autodepuración

La inactivación de los microorganismos patógenos e indicadores en ambientes naturales es el producto de la acción de fenómenos de la naturaleza muy variados que se pueden clasificar en tres grupos: físicos, químicos y biológicos. No obstante es difícil conocer la acción de cada uno de ellos por separado en ambientes tan complejos como los acuáticos, de manera que aunque se estudien de forma separada, su acción en la naturaleza se ejerce como la suma de casi todos.

La autodepuración de los sistemas naturales involucra una serie de complejos fenómenos que implican la adsorción de bacterias y bacteriófagos a sedimentos, depredación, dilución, inactivación por efectos de la temperatura y la radiación solar, que favorecen a especies más resistentes o adaptadas.

El principal factor inactivador en sistemas a cielo abierto es la radiación solar. Se ha demostrado que la inactivación de diferentes grupos bacterianos es de 2 a 3 UL, en experiencias comparadas con la inactivación en oscuridad. Algunos autores señalan la radiación solar, como principal factor inactivador, sin dejar de lado que la inactivación natural se produce como la suma de varios factores (predación por protozoos, estrés osmótico, adsorción a partículas y deficiencias de nutrientes).

Dentro de las longitudes de onda de la radiación solar, los rayos UV y la luz visible, parecen ejercer con mayor fuerza su acción sobre bacterias y virus, al captar oxígeno molecular y estimular a los fotosensibilizadores. La función ecológica de los sensibilizadores es acentuar los efectos deletéreos de la radiación solar sobre bacterias, virus y bacteriófagos.

Uno de los factores que influye en la absorción o difracción de la luz solar en el agua, es la turbidez, que unido al hecho de que las bacterias y bacteriófagos tienden a la adsorción a partículas del agua, puede generar un efecto protector. La profundidad también es un factor determinante. Dado que, en las capas superficiales la absorción de luz es más efectiva.

Durante el verano, no sólo se aumenta la temperatura (14-26 °C) como resultado de la absorción solar por parte del agua, sino el oxígeno disuelto (0,8 a 10 ppm) y el pH (7,5 –8,4) como producto de la actividad fotosintética de las algas. Al analizar la influencia de estos factores en la inactivación microbiana, se advierte que no sólo la radiación solar juega un papel importante, sino también el oxígeno disuelto, dado que estimula los fotosensibilizadores con la siguiente disminución de los coliformes fecales, enterococos y F+.

El mecanismo por el cual los niveles elevados de pH causan mayor alteración en CF, así como la capacidad de inactivación por longitudes de onda larga, no es muy claro; sin embargo existen dos posibilidades: que el pH disminuya la resistencia de los microorganismos a los efectos de la radiación solar, o que incremente la producción de formas tóxicas de oxígeno e induzca cambios en la ionización o configuración de algunas moléculas implicadas en este complejo proceso. La alteración en las membranas hace pensar que frente a un aumento en el pH pueden generarse flujo de iones hidroxilos, los cuales incrementan el pH interno de coliformes fecales o enterococos alterando su funcionamiento.

Todos los indicadores se inactivan más rápidamente durante el verano, dada las diferencias en las características del agua en ambos periodos (pH, temperatura, radiación solar) de manera que la inactivación se presenta como un fenómeno integrado, debido posiblemente a fenómenos de foto-oxidación generados por la radiación solar y la materia orgánica, catalizados por el oxígeno e influenciados por la turbidez del agua que permite la absorción de la radiación solar. Este fenómeno unido a fluctuaciones del pH, induce cambios conformacionales de la cápside de los bacteriófagos alterando su infectividad.

Aguas subterráneas

La contaminación de un acuífero por aguas residuales generalmente se presenta por el mal estado de las redes de alcantarillado, fosas sépticas, lixiviados de vertederos incontrolados o mal construidos. De esta manera los patógenos bacterianos y virales, pueden llegar a fuentes subterráneas, dado que los movimientos migratorios suceden en sentido vertical y horizontal y el grado de migración depende del tipo de suelo, de las lluvias y de la carencia de fuentes de contaminación.

Factores como el clima (temperatura y precipitaciones), la naturaleza del suelo (textura y estructura) y el tipo de virus determina la migración y la supervivencia de los patógenos, una vez han sido introducidos en el suelo.

Las características físico-químicas del agua pueden tener un efecto significativo en el aumento y reversibilidad de la adsorción microbiana sobre las superficies sólidas. El pH del agua subterránea influye en la adherencia de los microorganismos a superficies sólidas; en general parece ser más eficaz cuando las superficies son ligeramente ácidas. Por otro lado la materia orgánica influye no sólo en el porcentaje de crecimiento bacteriano, si no que también afectan el

transporte microbiano en el agua subterránea, dado que altera el tamaño celular y la hidrofobicidad. Se sabe que en presencia de diferentes concentraciones de nutrientes, las bacterias presentan diferente tamaño. También se describe que las condiciones de inanición pueden incrementar la hidrofobicidad de las células y la adherencia, al menos en algunas especies.

Estructuras celulares como las fimbrias o flagelos, facilitan también, la adsorción bacteriana, incluso en condiciones de estrés. El papel de las fimbrias en la adherencia depende de las cargas positivas y su aparente capacidad de penetrar la barrera de energía electrostática entre la bacteria y la superficie. Las fimbrias se encuentran casi exclusivamente en bacterias Gram negativas y pueden ser características tanto de bacterias ambientales como contaminantes. Los flagelos también facilitan la adsorción bacteriana a algunas superficies inorgánicas. En este aspecto las colas de los bacteriófagos se comportan de igual forma que los flagelos.

También se puede presentar adsorción reversible, siendo este un fenómeno primordial en este tipo de aguas, dado que ante cambios en las características químicas del agua (pH, fuerza iónica) o turbulencia de la misma, los microorganismos pueden ser desadsorbidos. Los microorganismos pueden sufrir desorción de la superficie del suelo en respuesta a cambios de pH y baja concentración de sales en solución debido a la lluvia.

La supervivencia de bacterias desplazadas en el acuífero depende de factores como temperatura, competencia microbiana, presencia de predadores y parásitos, composición química del agua subterránea, materia orgánica y grado de adherencia.

Sistemas artificiales de desinfección

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los microorganismos que causan enfermedades. No todos son destruidos en este proceso, punto en que radica la diferencia con la esterilización. No debe perderse de vista que el objetivo de la depuración o aún de la potabilización del agua, no es obtener agua estéril, si no libre de patógenos o, según sea el caso, potable.

Los desinfectantes más corrientes son agentes químicos oxidantes, de los cuales el cloro es el más representativo dado la amplia difusión de su uso. El ozono es un desinfectante eficaz, cuyo uso va en aumento, aunque al contrario del cloro, no mantiene efecto residual y su costo es más elevado, teniendo en cuenta las características de producción que conllevan alto gasto de energía.

Las cinéticas de inactivación en diferentes tipos de agua están influenciadas por sustancias como la materia orgánica, que interfiere en los mecanismos de acción del desinfectante, pH y temperatura.

El pH y la temperatura influyen de manera directa, ya que afectan la ionización de los desinfectantes en el medio acuoso. Además niveles de pH inferiores a 3 o superiores a 10 afectan la viabilidad de los organismos.

La materia particulada presente en el agua es también un factor decisivo en este proceso, ya que permite los fenómenos de adsorción enmascarando la acción del desinfectante. Por esta razón es necesario aplicar procesos previos de eliminación de sólidos suspendidos y materia orgánica. Las sustancias químicas que interfieren en este proceso incluyen componentes orgánicos, nitrógeno, hierro y manganeso.

Los sitios de acción de los desinfectantes son de tres tipos: la membrana citoplasmática, las enzimas que intervienen en las cadenas respiratorias y en las síntesis proteica, y sobre los ácidos nucleicos (ADN y ARN). La lisis bacteriana, por ruptura de la pared, es un fenómeno raro que sólo sucede con dosis muy altas de desinfectante, sobre todo el ozono.

La resistencia de los microorganismos a los desinfectantes depende de diversos factores: la temperatura del agua, la naturaleza del microorganismo, su estado físico o fisiológico, la naturaleza y concentración del oxidante, la exposición repetida del organismo al desinfectante. La fijación de los microorganismos a partículas sólidas aumenta mucho su resistencia a los desinfectantes al enmascarar su acción inactivadora. Los restos de células huésped lisadas que sirven de soporte a los poliovirus en el medio acuático les confieren una protección sustancial frente a la inactivación por HOCl u ozono, en comparación con los virus libres en suspensión.

Las bacterias que sobreviven en condiciones límite, tanto desde el punto de vista de la escasez de alimento, de temperatura o concentración de tóxicos o incluso dañadas, presentan una mayor resistencia a los desinfectantes. Esta resistencia se debe a la síntesis inducida de proteínas específicas del estrés; por tal razón la inactivación de cepas de laboratorio es mayor que la de los mismos grupos naturales.

La esporulación es otra de las formas de resistencia de ciertas bacterias frente a condiciones adversas. Por este motivo las esporas de clostridios sulfito reductores son buenos modelos conservativos de la resistencia de los virus a la desinfección, pues son algo más resistentes que ellos y mucho más que las formas vegetativas de las bacterias.

La eficacia en la desinfección del agua se ha medido tradicionalmente a través de los coliformes totales, fecales y estreptococos fecales; sin embargo, muestran varios inconvenientes.

Los coliformes específicamente los termotolerantes o coliformes fecales, se utilizan para evaluar el efecto de la desinfección en procesos de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo se reconoce que son un modelo inadecuado para evaluar la inactivación de virus humanos, dado que, son generalmente más resistentes a la inactivación.

Análisis realizados para evaluar la reducción de bacteriófagos en procesos de desinfección en aguas residuales tratadas, muestran que aunque las reducciones son altas, la eficacia del proceso no es suficiente en todos los casos para obtener en el efluente niveles de CF > 100 UFC/100 ml. Con aplicación de diferentes concentraciones de cloro (20, 30 y 40 ppm) se observa la siguiente tendencia de inactivación:

CF > ENT > SOM > F+ > RYC > CP
Mayor sensibilidad Mayor resistencia

Riego agrícola con aguas residuales

Las aguas residuales desempeñan una importante función como sustituto del agua de abastecimiento empleada para el riego en la agricultura, contribuyendo a la conservación del agua y ofreciendo beneficios económicos. El objetivo primario de la práctica debe ser el garantizar el aprovechamiento racional de las aguas residuales y, al mismo tiempo, proteger la salud.

Algunos de los compuestos presentes en el agua residual doméstica y que se pueden considerar como contaminantes (especialmente compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio), sirven como nutrientes cuando el agua se aplica al suelo. Estudios realizados en varios países han demostrado que, con una gestión apropiada, es posible incrementar el rendimiento de los cultivos regándolos con aguas residuales sin tratar o con efluentes sometidos a tratamiento primario y secundario (OMS, 1989; EPA, 1992).

Por otra parte, el vertido de aguas residuales, sin tratar o parcialmente tratadas, al medio ambiente puede crear problemas de contaminación del agua subterránea y superficial así como del suelo. Además el uso de aguas residuales, para riego, en sustitución del agua subterránea, disminuye los problemas de intrusión marina a causa de la excesiva explotación de aguas subterráneas en las zonas costeras.

Uno de los aspectos negativos de la reutilización del agua residual doméstica para el riego en la agricultura, es el riesgo de contaminación por microorganismos patógenos que pueden causar enfermedad en el hombre. Muchos países han adoptado normas microbiológicas muy estrictas para las aguas residuales regeneradas, basándose exclusivamente en criterios indicadores de la calidad bacteriológica. Algunos han utilizado sistemas de tratamiento terciario cuando ha estado a su alcance y han instalado los sistemas necesarios para la filtración rápida en arena y cloración después del tratamiento biológico secundario en aguas residuales. En varias regiones se empiezan a emplear otros sistemas de desinfección (ozono, radiación ultravioleta, ultrafiltración), para eliminar cualquier riesgo sanitario para el hombre (Asano, 1987; Asano et al., 1992).

La aplicación al suelo del agua residual doméstica regenerada se puede considerar y llevar a cabo como tratamiento de las aguas residuales (vertido de aguas al suelo) o como aguas de riego (riego de cultivos). El término infiltración lenta se refiere al uso del suelo como sistema de eliminación y tratamiento del agua residual mientras que los términos

reutilización en la agricultura y riego con aguas residuales implican que el agua recuperada es utilizada para el riego como un sustituto de un recurso hídrico convencional (Asano y Levine, 1998).

Más del 67% del agua en el mundo está asociada con la producción agrícola, lo que hace de esta actividad un buen objetivo para la reutilización del agua residual regenerada. A partir de 1960 el uso del agua regenerada para el riego en la agricultura prácticamente se ha duplicado. Las ventajas de este tipo de actividad son:

- Sustitución del agua de distribución
- Incremento en los campos de cultivo regados
- Disminución en la demanda de fertilizantes químicos

Eliminación de microorganismos provenientes del agua residual doméstica en el suelo y el agua subterránea

El aumento en el número de casos de contaminación en suelos y aguas subterráneas por microorganismos provenientes del agua residual, ha hecho incrementar la investigación de los mecanismos de eliminación de bacterias, virus y parásitos en el suelo.

Los estudios realizados establecen una relación clara entre las fuentes de contaminación de los suelos y de las aguas subterráneas. Se sabe que los microorganismos que provienen del agua que se aplica al suelo, se pueden transportar o eliminar dependiendo de una serie de mecanismos (Bitton y Harvey, 1992).

En relación a los mecanismos que influyen en el transporte y eliminación de virus y bacterias aplicados al suelo, Ho et al., (1991), encontraron que los microorganismos pueden ser eliminados por dispersión, adsorción, filtración y muerte de la siguiente manera:

1. Si el organismo no interactúa con el suelo, continúa su recorrido con el agua y se dispersa por diferentes vías a través de los poros del suelo.
2. Si se inicia la adsorción al suelo, no aparece ningún tipo de microorganismo a la salida de la columna hasta que se satura la capacidad de adsorción y la concentración de microorganismos en el agua filtrada alcanza valores parecidos a los de entrada.
3. Si hay filtración se reduce la concentración de microorganismos a la salida.
4. Si hay muerte de microorganismos debido a condiciones ambientales adversas, se produce una reducción en la concentración de organismos a la salida de la columna.
5. Cuando se da una combinación de filtración, adsorción y muerte, el comportamiento de los microorganismos es más difícil de predecir.

La acción de los mecanismos mencionados anteriormente en los diferentes tipos de microorganismos (bacterias, virus y parásitos), puede variar dependiendo del tipo de sistema en que se encuentren (agua o suelo). Los factores que influyen en la eliminación de microorganismos en el suelo se pueden clasificar en físicos, químicos y biológicos.

- **Factores físicos:**
 - Textura y estructura del suelo
 - Carga hidráulica
 - Conductividad hidráulica
 - Flujo de agua en el suelo (saturado y no saturado)
 - Humedad
 - Temperatura
 - Lluvia
- **Factores físico-químicos y químicos:**
 - pH
 - Carga iónica
 - Contenido de materia orgánica
- **Factores Biológicos**
 - Tipo de microorganismo
 - Microflora antagónica
 - Microorganismos productores de sustancias inhibidoras

Los dos mecanismos que influyen de manera más importante en la eliminación de microorganismos por debajo de la superficie del suelo son la supervivencia y el movimiento. Estos dos mecanismos se deben considerar cuando existe un riesgo de contaminación del aguas subterránea por microorganismos patógenos. Si un microorganismos puede sobrevivir por varios periodos de tiempo debajo de la superficie del suelo, pero no puede moverse a través del suelo, no representa un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Ocurre lo mismo cuando el microorganismo es transportado a través del suelo pero no puede sobrevivir por periodos largos de tiempo (Yates y Yates, 1991).

CONCLUSIONES

- La evaluación microbiológica del agua requiere el uso de indicadores de contaminación fecal que reflejen el comportamiento de los patógenos en los diferentes ecosistemas.
- El comportamiento de los indicadores de contaminación fecal puede variar dependiendo de las condiciones ambientales de cada sistema.
- Las bacterias son inactivadas de manera más eficiente que los virus y los parásitos en todos los sistemas evaluados.
- Tanto los sistemas naturales como los artificiales ayudan a la eliminación de microorganismos y pueden actuar como sistemas de desinfección con diferentes niveles de eficiencia.

Bibliografía

- ASANO, T. (1987). "Irrigation with reclaimed municipal wastewater. *Geojournal*. 15, 273-282.
- ASANO, T., LEONG, L., RIGBY, M. AND SAKAJI, R. (1992). "Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data". *Water Science and Technology*. 26, 1513-1524.
- ASANO, T. AND LEVINE, D. (1998). "Wastewater reclamation, recycling and reuse: an introduction. In wastewater reclamation and reuse". Edited by Takashi Asano. Technomic Publishing. Lancaster. 1528 pags.
- BITTON, G. AND HARVEY, R. (1992). "Transport of pathogens through soils and aquifers". In *environmental microbiology*. 19 th Edited by Ralph Mitchell. New York. 103-123 pags.
- CAMPOS, C. (2002). "Removal of bacterial and viral faecal indicator organisms in a waste stabilization pond system in Choconta, Cundinamarca (Colombia)". *Water Science and Technology*. 45 (1) 61-66.
- DURAN, E. (2001). "Comportamiento de los bacteriófagos propuestos como microorganismos modelo frente a diferentes procesos naturales y artificiales en agua". Tesis doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. 263. págs.
- ENVIRONMENTAL PROTECCIÓN AGENCY. (1992). "Guidelines for water reuse". EPA/625R-/92/004.
- HO, G., GIBBS, A. AND MATHEW, K. (1991). "Bacteria and virus removal from secondary effluent in sand and red mud columns". *Water Science and Technology*. 23, 261-270.
- INCO-DC: International Co-operation with Developing Countries (2001). "Evaluation of the usefulness of bacteriophages as model micro-organisms for the assessment of water treatment processes and water quality". Final Report. European Community 130 págs.
- ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD. (1989). "Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura". Serie de informes técnicos 778. Ginebra. 90 págs.
- ROLIM, S. (2000). "Sistemas de lagunas de estabilización". Mc Graw Hill. Bogotá. Primera edición. 370 págs.
- YATES, M. AND YATES, S. (1991). "Modeling microbial transport in the subsurface. A mathematical discussion". In *modeling the environmental fate of microorganisms*. Edited by Christon J. Hurst. American Society for Microbiology, Washington, p 48-76.