

LA INFILTRACIÓN-PERCOLACIÓN COMO SISTEMA DE DEPURACIÓN AVANZADA DE AGUAS RESIDUALES POR ZONA VADOSA

Montserrat Folch^{1*}, Miquel Salgot¹ y François Brissaud^{2†}

1: Institut de Recerca de l'Aigua de la Universitat de Barcelona
Unitat d'Edafologia. Facultat de Farmacia
Universitat de Barcelona

Joan XXIII, s/n. 08028, Barcelona, España
e-mails: mfolch@ub.edu; salgot@ub.edu

2: Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier
USTL, Montpellier II

CC 57, Université Montpellier 2, 34095 Montpellier Cedex 5, France
e-mail: brissaud@msem.univ-montp2.fr

Palabras clave: Infiltración-Percolación, aguas residuales, depuración avanzada, procesos

RESUMEN. *Los tratamientos del agua residual, tanto los secundarios como los de regeneración o los avanzados se pueden llevar a cabo mediante tecnologías blandas, que suelen tener una huella energética reducida. Estas tecnologías se basan en potenciar mecanismos naturales como los que se dan en suelos y zonas vadosas, en que los aportes de oxígeno desde la atmósfera, la formación de biopelículas y otros mecanismos permiten actuar sobre diversos contaminantes de las aguas residuales. Entre estas tecnologías se encuentra la denominada Infiltración-Percolación modificada (IPm) de la que hay numerosas instalaciones en Francia y algunas en España. Se analiza la eficiencia de la depuración mediante este sistema en las instalaciones españolas, explicándola en función de los mecanismos naturales en suelos y zonas vadosas. La IPm presenta resultados excelentes por lo que respecta a desinfección, eliminación de sólidos en suspensión y transformación del nitrógeno.*

ABSTRACT. *Wastewater treatment, either secondary, advanced, or for reclamation, can be successful if extensive technologies, with reduced energy footprints, are employed. Soft or extensive technologies are usually based in natural mechanisms, with efficiency increased artificially, like the ones found in soil or vadose zones. In these systems, oxygen supply from the atmosphere, biofilm formation and other natural mechanisms allow the reduction or elimination of pollutants found in wastewater. IPm (Infiltration-percolation modified) can be included among soft technologies. Hundreds of such facilities can be found all over France, but only several units in Spain. Some Spanish IPm filters are described and its treatment results analyzed in relation with the natural mechanisms acting in soils and vadose zones. The IPm facilities have shown to be an excellent treatment for disinfection, suspended solids removal and nitrogen transformation.*

1. INTRODUCCIÓN

La regeneración de aguas residuales para su reutilización posterior puede llevarse a cabo mediante tecnologías extensivas o intensivas. Entre las últimas han destacado en los últimos años las zonas húmedas construidas y la infiltración-percolación, como tecnologías cuyas instalaciones se construyen en superficie, y los sistemas SAT y similares como tecnologías en profundidad en las que se emplean los suelos y acuíferos para el tratamiento del agua. En ambos casos se aprovecha la capacidad de autodepuración de la zona vadosa, que puede estar o no saturada de agua en el momento de la depuración; es decir se puede trabajar en aerobiosis o anaerobiosis.

El concepto del empleo de suelos, dunas, riberas de río o estructuras similares es relativamente antiguo, incluso si nos remontamos a los inicios del saneamiento colectivo considerado como ciencia. Los antecedentes son los

campos de aplicación de agua residual en Alemania o Francia, que se emplearon durante bastantes décadas para la eliminación de las aguas residuales, con lo que se preservaba a los ríos de la contaminación causada por el vertido directo de aguas residuales (Vedry et al., 2001).

En los últimos años se está prestando especial atención a las tecnologías blandas o extensivas de regeneración de aguas residuales, puesto que su huella energética es reducida y permiten obtener efluentes de calidad adecuada para la reutilización.

Las tecnologías extensivas se basan en intentar potenciar mecanismos naturales, como los que se dan en las zonas vadosas naturales, en las que los aportes de oxígeno desde la atmósfera, la formación de biopelículas y otros mecanismos aerobios/anaerobios permiten actuar sobre diversos contaminantes de los efluentes de depuradora

La técnica fue evolucionando a lo largo de los años correspondientes a la mitad del siglo 20, y hasta los años 80, desembocando en los sistemas de percolación a través de dunas en la costa este de los USA y en algunos lugares de la costa atlántica de Francia; en los sistemas tipo SAT en Arizona y otros lugares de USA, o los MAR (Managed Aquifer Recharge) descritos en Australia. La característica común a todos estos lugares es que se emplean estructuras naturales y el agua se considera perdida o bien se recupera del acuífero.

Una evolución de estos sistemas ha sido la Infiltración-Percolación (IP), que tomó carta de naturaleza en Francia a partir de los años 70 del siglo pasado, inicialmente con el nombre de geosaneamiento (Brissaud y Joseph, 1989). La IP es un sistema de tratamiento de aguas residuales por filtro de arena calibrada, con alimentación secuencial y recuperación de agua.

También cabe destacar los sistemas denominados zonas húmedas construidas (ZH) o humedales construidos, que pueden ser de flujo vertical u horizontal; este último subsuperficial. En ambos casos se trabaja teóricamente con un flujo principalmente de tipo pistón, aunque la diferencia fundamental radica en que los de flujo vertical (ZHfv) son sistemas básicamente aerobios.

2. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS IP

La infiltración-percolación modificada (IPm) se clasifica como tecnología blanda y dentro de los sistemas edáficos complejos, ya que utiliza suelos naturales o aportados como medio de depuración. La IPm es un proceso de depuración aerobio, que consiste en infiltrar aguas residuales urbanas previamente decantadas o efluentes secundarios, a razón de algunos centenares de litros por metro cuadrado y por día, a través de un espesor de arena aportada.

En sus inicios, esta técnica trabajaba con sistemas edáfico/geológicos “in situ”, constituidos por espesores de arena considerables, de hasta 30 o más metros. El agua se depositaba sobre el terreno en una sola aplicación, hasta alcanzar una altura determinada y se dejaba percolar lentamente, en condiciones casi totalmente anaerobias. Una vez el agua alcanzaba la capa freática, se perdía o era recuperada del acuífero al cabo de un tiempo considerable.

La infiltración-percolación fue objeto de importantes programas de investigación en los E.E.U.U., a nivel de laboratorio y en instalaciones piloto. Los estudios de Flushing Meadows, cerca de Phoenix (Arizona), entre 1967 y 1977 son puntos de referencia esenciales en la historia de esta técnica. En 1981, la Environmental Protection Agency (E.P.A.) censó más de 320 instalaciones de este tipo en los Estados Unidos, de las cuales más de la mitad se situaban en California. Actualmente, estas instalaciones siguen funcionando sin problemas siempre que su gestión haya sido correcta (Brissaud y Lesavre, 1993).

Este sistema de tratamiento fue adoptado en otros países con ciertas modificaciones, sobre todo en Francia e Israel. El proyecto de la región de Dan, en Israel, está considerado como una de las operaciones de infiltración percolación más grandes del mundo, con un caudal anual tratado de $120 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. En este lugar, los efluentes de un tratamiento por lodos activados se infiltran en una formación de arena de duna y percolan a través de 30-40 m de zona no saturada, antes de recargar una capa freática que posteriormente se explota según las necesidades de riego de una gran región del país (Shelef, 1991). En Francia, el primer sistema de infiltración percolación se instaló en 1981 en el cordón dunar de Port Leucate, donde se infiltran los efluentes secundarios producidos durante la temporada turística, alimentando una capa freática. Actualmente, existen en Francia varios cientos de instalaciones de infiltración percolación de este tipo y otros más evolucionados (Brissaud, 1993).

A finales de la década de los 80, se desarrolló en Francia la denominada **Infiltración Percolación modificada (IPm)** con el fin de conseguir una mayor independencia del contexto hidrogeológico y extender así el ámbito de aplicación de la infiltración percolación. El suelo del lugar fue sustituido por arena aportada y se introdujeron sistemas de impermeabilización de fondo, y en consecuencia de drenaje.

La IPm ha sido objeto de una serie de mejoras con respecto a la estandarización del tamaño del material filtrante, al reparto de los efluentes en la superficie de infiltración y al régimen de los aportes. Estos avances se han ido produciendo a medida que se han ido desarrollando los fundamentos teóricos de la técnica y ésta ha ido perdiendo su carácter empírico inicial (Brissaud, 1993).

En las primeras instalaciones de IPm, el material de relleno fue material procedente del cauce de un río sin clasificarlo por tamaño, pero no se obtuvieron resultados adecuados. En desarrollos posteriores, se llegó a la conclusión de que el mejor material era la arena de entre 0,2 y 1 mm de diámetro equivalente, tamaño luego extendido a 2 mm para algunos casos concretos.

En cuanto a la aplicación del agua al lecho filtrante, uno de los problemas iniciales fue conseguir un reparto homogéneo en todo el sistema. Las primeras instalaciones tenían uno o, como mucho, dos puntos de aplicación en uno de los extremos, lo que causaba desigualdades de aplicación y que en las cercanías del punto de vertido aparecieran caminos preferenciales de infiltración y encharcamientos. Como consecuencia, se producían colmataciones puntuales y pérdidas de capacidad total de depuración. En sistemas posteriores se recurrió a aplicaciones longitudinales, que mejoraron el reparto pero se demostraron insuficientes para homogeneizar el volumen de efluente aplicado en cada punto concreto (Brissaud et al., 1991).

La IPm llegó a España en 1991 donde se introdujeron mejoras en la aplicación. Por una parte se utilizó un pivote de riego por aspersión para el reparto del agua en superficie y por otra se implantó césped en la zona de infiltración. Con esto, se consiguió una entrada del agua en toda la superficie, lo que asegura a efectos prácticos un reparto homogéneo en toda la superficie filtrante; a lo que ayuda el césped. El último desarrollo en este sentido es el uso de sistemas de aplicación subsuperficial empleando líneas de goteros (Tabla 1). En otro sentido, y para asegurar la renovación de aire en el interior del macizo de filtración se comenzaron a situar en el filtro sistemas internos de aireación. Los primeros ensayos se habían realizado en el Grau du Roi (Brissaud et al., 1991) y luego se implantaron en las instalaciones españolas.

La primera planta de demostración en España se construyó entre 1991 y 1992 en la depuradora de Vall-Llobrega (Girona), a ésta siguieron la de Sant Lluís (Menorca) y la de Piera (Barcelona); actualmente también se encuentran instalaciones en Torreveja (Alicante), Hostalets de Pierola (Barcelona) y Bétera (Valencia), además de una segunda unidad en Sant Lluís.

La característica diferencial de la IPm respecto a otros sistemas similares, es que se distribuye el agua a depurar en varias "dosis" a lo largo del día. Los primeros sistemas americanos tenían un modelo de aplicación basado en un único aporte, que se infiltraba en un tiempo que no solía ser inferior a varias semanas. El área de infiltración debía dejarse en reposo durante un tiempo prolongado. El sistema era casi completamente anaerobio. Posteriormente, y ya en Europa, a fin de trabajar con un sistema aerobio, se diseñó un reparto secuencial del efluente. Se trataba de distribuir un cierto volumen por unidad de superficie en varias aplicaciones a lo largo de un tiempo determinado.

La aplicación de efluente con un modelo como el descrito debe permitir el desarrollo de un cultivo bacteriano específico sobre la base de filtración, arena calibrada. En la actualidad, la IPm se puede definir como un proceso de película microbiana, aerobio, secuencial o discontinuo, y que adicionalmente ofrece características de filtro.

3. MECANISMOS DE TRATAMIENTO

Los autores que han trabajado con sistemas IP (Folch et al., 2001, Bancolé et al., 2003) describen los mecanismos como los de un proceso de depuración que utiliza un sistema teórico de suelo como filtro y como reactor biológico aerobio. La discusión sobre los mecanismos de tratamiento de la IPm se ha basado tradicionalmente en la comparación con otros procesos de depuración de agua residual. Se suele considerar el lecho de filtración únicamente como una zona vadosa, aunque existen intervenciones discrepantes que señalan que coexisten en el sistema mecanismos propios de un suelo. Puesto que una variante de la IPm incluye la presencia de césped en superficie, el filtro pasa a ser un sistema SPAC (continuo suelo-planta-atmosfera) en el

que la vegetación ejerce diversos papeles, desde un papel puramente físico de fijación de la arena, en instalaciones en las que se dan vientos fuertes, y de mejora de la distribución superficial hasta roles variados de eliminación de nutrientes y mejora de los procesos de percolación por la acción de las raíces de la vegetación. También hay una cierta evaporación del agua y ocasionalmente problemas de reducción de la velocidad de paso si no se gestiona bien la vegetación y se produce una capa de fieltro (*thatch*) impermeable.

El sistema, poroso por definición, actúa sobre la carga contaminante del agua mediante tres mecanismos básicos: (a) filtración superficial, (b) oxidación biológica, (c) desinfección.

Por otra parte, en el momento en que el agua comienza a percolar e infiltrarse en la arena se inicia una serie compleja de interacciones de tipo físico, químico y microbiológico.

Aunque se sabe que los microcontaminantes orgánicos son eliminados, al menos en parte, por los sistemas de IPm (Romero et al. 2003), todavía no se conocen exactamente los mecanismos de degradación que en principio debería ser aeróbica, suponiéndose que la biopelícula ejerce una acción importante en el proceso.

3.1. Mecanismos físicos

El sistema es inicialmente un filtro de arena de diámetro definido que actúa como un suelo o como una zona vadosa, con una textura adecuada, en la que se dan mecanismos relacionados con el tamaño del sustrato. En este sentido, Porta et al. (2003) indican que el suelo es un sistema de tres fases; una fase sólida formada por los componentes inorgánicos y los orgánicos, que dejan un espacio de huecos (poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hallan las fases líquida y gaseosa.

En la IPm se aplica agua residual de forma que, en un filtro y funcionamiento ideal, la fase sólida es casi exclusivamente arena, en la que se desarrolla una biopelícula de espesor variable en función de la gestión de la aplicación. Según el grado de desarrollo de la película en un instante determinado, la permeabilidad es distinta. En un filtro en funcionamiento normal, en el momento en que se inicia el paso del agua la biopelícula reanuda su actividad hinchándose y reduciendo el tamaño de poro y por tanto la velocidad de infiltración. Cuando cesa el aporte de agua la biopelícula recupera su tamaño inicial, y, en consecuencia, al mismo tiempo vuelve a aumentar la capacidad de infiltración. El tamaño de la arena debe ser suficientemente grande para que el tamaño de poro permita el paso del agua y del aire incluso cuando la biopelícula alcanza su mayor espesor (no hay colmatación), pero al mismo tiempo lo suficientemente pequeña para que la velocidad de paso del agua no sea demasiado rápida en relación con las cinéticas de oxidación.

En el momento de la aplicación del agua, el macizo de arena actúa como filtro en el sentido físico del término y retiene los sólidos en suspensión en superficie. El tamaño de los sólidos retenidos variará en función del tamaño de la arena y de si sus poros se hallan o no obstruidos – total o parcialmente – por la materia orgánica de la aplicación anterior o por algún otro componente del agua a tratar (como pueden ser las grasas). Figura 1

Perfil del filtro	1. Zona de aplicación de agua (superficie) por pivote, goteros, medias cañas, etc.	Puede formarse costra por retención de SS
	2. Intervalo aerobio entre el paso de 2 frentes de agua	Arena calibrada en 1,5 m
	3. Zona con poros temporalmente saturados (paso del frente con agua)	Zona con biopelícula oscilante (Aumenta con el paso del frente de agua, se reduce en los intervalos)
	4. Zona no saturada	Puede contener un sistema de aireación pasiva
	5. Intervalos en que la biopelícula retiene agua y materia orgánica (coloidal) que se degrada. Otras interacciones: oxidación de nitratos, desinfección...	Alternan en profundidad zonas saturadas y no saturadas
Drenaje	6. Agua libre	Gravas y tuberías: 40 cm aprox.

Figura 1. Paso del agua a través de un sistema de IPm

La fase semisólida (la biopelícula) entra en contacto con el agua que fluye y capta materia orgánica coloidal o disuelta y nutrientes para su crecimiento. Como consecuencia, la materia orgánica que ha percolado con el agua se degrada.

Por tanto, los sólidos en suspensión (SS) son retenidos en la superficie del macizo filtrante y con ellos una parte de la contaminación orgánica (DQO particulada) y una parte de los microorganismos patógenos. La efectividad del proceso dependerá teóricamente del tamaño de partícula, en este caso del diámetro equivalente del grano de arena. Este tamaño definirá el diámetro de poro y por tanto la capacidad de filtración.

Además de la filtración y el intercambio con la película, pueden producirse fenómenos de absorción y adsorción en la biopelícula o en el material filtrante.

Para que el proceso funcione correctamente es necesario que el agua aportada no tenga finos en cantidad apreciable (e.g. arcillas) ni elementos que se adhieran a la superficie de las partículas o que formen capas impermeables en superficie, como las grasas y aceites.

En términos físicos, también puede describirse que la fase gaseosa y su composición dependerán de los patrones de flujo de agua. En general, el paso de los diferentes frentes de agua por el filtro crea un vacío posterior que es llenado por aire de la atmósfera que contiene un 20% de oxígeno. El agua percolante también contribuye aunque en menor medida a introducir oxígeno en el medio. Los gases resultantes de la degradación aerobia de la materia orgánica serán arrastrados por el agua o bien pasarán a la atmósfera del suelo.

3.2. Mecanismos químicos

En cualquier suelo o zona vadosa pueden describirse procesos relacionados con la materia orgánica o con los componentes inorgánicos.

El medio granular constituye un reactor biológico, un soporte de gran superficie específica sobre el que se fijan y desarrollan las bacterias responsables de la oxidación de la carga contaminante: materia orgánica, nitrógeno orgánico y amoniacal. Para ello se requiere oxígeno que proviene de la fase gaseosa del suelo y de los intercambios gaseosos con la atmósfera, tal como se ha indicado.

Como en todos los procesos biológicos, la oxidación de la materia orgánica es paralela a un proceso de desarrollo bacteriano. Hay un riesgo de colmatación interna del macizo filtrante si la producción de biomasa no está equilibrada por los procesos biológicos que la regulan. Los procesos de oxidación de la materia orgánica y del nitrógeno en el curso de una infiltración intermitente han sido estudiados mediante un modelo numérico (Bancolé et al., 2003). La calibración de este modelo se efectuó empleando datos experimentales de un sistema de tratamiento situado en Mazagón (Mottier et al., 2000). El modelo permite prever el desarrollo de la biomasa y definir un modelo de gestión que mantenga en un máximo la capacidad de depuración de la IPm.

Por otra parte, se dan también en el reactor o filtro de arena fenómenos de adsorción y de intercambio iónico, considerados como reacciones de superficie. Porta et al. (2003) señalan que los elementos químicos del suelo pueden ocupar distintas posiciones, de las que en un sistema como la IPm interesan:

- Elementos inmovilizados en una estructura mineral cristalina, en aluminosilicatos amorfos y en compuestos orgánicos.

- En la interfase sólido-líquido, localizados en la superficie de determinadas partículas y en su área de influencia, teniendo lugar reacciones de superficie con uniones de distintos tipos entre el elemento y la superficie.

- En la fase líquida. El agua contendrá elementos en solución y material coloidal soluble o pseudosoluble. Al secarse el filtro precipitan y al añadir agua vuelven a disolverse.

Todos estos elementos presentan una elevada movilidad, pudiendo ser transportados hasta el fondo del filtro y luego eliminados con el percolado. En general, los fenómenos que se dan en un sistema IPm dependerán casi exclusivamente de la arena y de la biopelícula fijada, ya que por definición no habrá arcilla en el sistema. Debido a esto, se deberá trabajar en fenómenos de adsorción y de intercambio, excluyéndose la distribución de iones en sistemas arcilla-agua, mucho más compleja.

3.3. Mecanismos biológicos

La actividad biológica en los sistemas IPm está relacionada principalmente con la presencia de biopelícula que se desarrolla sobre los granos de arena. En el caso de que se haya plantado césped en el filtro, puede describirse una cierta influencia de la vegetación, especialmente de su zona radicular, en el sistema aunque

comparativamente no será muy importante.

Aparte de los procesos de degradación de la materia orgánica, es importante en los sistemas de IPm bien gestionados y no sobrecargados la transformación del nitrógeno en formas reducidas a nitratos (Folch 1999).

En la IPm es importante como fenómeno biológico la eliminación de microorganismos patógenos conseguida en el sistema por mecanismos, de filtración mecánica, adsorción y degradación microbiológica. La eficacia de esta eliminación (equivalente a una desinfección) es uno de los mayores intereses del proceso, y está muy ligada al tiempo de residencia del agua en el macizo filtrante y a la calidad de la oxidación. En este sentido cabe indicar que la gestión (volumen de agua en cada aplicación, tiempo entre dos aplicaciones sucesivas, períodos de reposo...) tiene una influencia clara en la efectividad de la desinfección (Folch, 1999). También se han descrito (Auset, 2002) mecanismos de predación por parte de organismos de la biopelícula, especialmente protozoos.

4. RESULTADOS

Desde 1992 se han efectuado controles analíticos físico-químicos y microbiológicos a la entrada y salida de varios sistemas de IP. Se incluyen datos de dos depuradoras de Cataluña con IPm como terciario (Palamós y Piera); de otra depuradora de Catalunya (Els Hostalets de Pierola) con IPm como tratamiento secundario; así como de los sistemas IPm de Bétera (Valencia) y Sant Lluís (Baleares) en que la IPm es terciario.

Tabla 1. Descripción de los sistemas IPm de los que se incluyen datos en este trabajo.

EDAR	Año de construcción	Superficie útil (m ²)	Tipo de riego	CU Material de relleno (arena)	Tipo de efluente aplicado	Carga hidráulica (m ³ /día)
Vall-Llobrega/ Palamós	1992	575	Superficial	2,2	secundario	0,527
Piera	1996	428	Superficial	2,18	secundario	0,514
Sant Lluís	1994	1254	Superficial	2,0	secundario	0,502
Els Hostalets de Pierola	1998	875	Superficial	10	primario	0,285
Bétera	2005	144	Sub-superficial	3,61	secundario	0,496

CU: coeficiente de uniformidad de la arena

Tabla 2: Media de los resultados físico-químicos del agua en los filtros de IPm en las depuradoras de Vall-Llobrega/Palamós, Piera, Sant Lluís, Els Hostalets de Pierola y Bétera.

EDAR	E SS	S SS	E DQO	S DQO	E N-NH ₄ ⁺	S N-NH ₄ ⁺	E-N-NO ₃ ⁻	E-N-NO ₃ ⁻
Vall-Llobrega/ Palamós	10,6	2,0	117,2	50	31,7	1,99	0,3	45,6
Piera	15,6	i.l.d	57,8	25	3,9	1,8	7,6	8,0
Sant Lluís	31,6	4,1	83,6	45,3	1,09	1,07	25,8	28,0
Els Hostalets de Pierola	171	13,1	540	99,4	55,1	9,3	0,8	30,0
Bétera	95,0	6,0	71,0	22,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

E: datos analíticos de agua de entrada. S: datos analíticos de agua de salida. n.d.: datos no disponibles. i.l.d.: inferior al límite de detección.

Tabla 3: Media de los resultados microbiológicos del agua en los filtros de IPm en las depuradoras de Vall-Llobrega/Palamós, Piera, Sant Lluís, els Hostalets de Pierola y Bétera.

EDAR	E. Coliformes fecales Log(ufc/100ml)	S. Coliformes fecales Log(ufc/100ml)	E. Bacteriofagos somáticos Log(ufp/100ml)	S. Bacteriofagos somáticos Log(ufp/100ml)
Vall-Llobrega-Palamós	4,9	1,2	2,3	1,4
Piera	3,8	1,2	1,4	0,9
Sant Lluís	4,8	1,8	2,7	1,5
Els Hostalets de Pierola	7,2	3,7	6,0	2,1
Bétera	4,0	1,7	4,2	1,0

E: datos analíticos de agua de entrada. S: datos analíticos de de agua de salida. n.d.: datos no disponibles.

En las tablas 2 y 3 se recoge la media de los resultados de los parámetros más significativos, físico-químicos y microbiológicos, obtenidos durante los periodos de varios años en los que se realizaron controles analíticos.

Los resultados obtenidos, todos ellos con datos de más de dos años y en el caso más desfavorable de no menos

de 25 muestras, han sido excelentes, consiguiéndose reducciones importantes en sólidos en suspensión, turbidez y materia orgánica, como se puede apreciar en la Tabla 2. También se puede indicar que se consigue una transformación del nitrógeno desde formas amoniacales a nitratos. Además se consigue desinfección adicional en este tipo de sistemas, dando calidades de agua aceptable para algunos de los usos propuestos en reutilización (Tabla 3). Hay que señalar que en ningún caso se han encontrado resultados positivos en los análisis de huevos de nematodo.

5. DISCUSION

En el contexto de la depuración mediante sistemas IPm, que se basan en utilizar las posibilidades que suelo y subsuelo brindan para mejorar la calidad de las aguas aplicadas en superficie, se puede señalar que:

- Por lo que respecta a los sólidos en suspensión y coloidales, se ejerce una acción de filtro que permite una reducción casi total de los mismos. Esta acción se debe tanto a la porosidad (acción pura de filtración) como a la retención en profundidad, tal como sucede en los suelos y formaciones de arena naturales. El cambio secuencial en el interior del filtro del diámetro de paso – desarrollo y resorción de la biopelícula - contribuye también a una mejora de la calidad por lo que respecta a la eliminación de sólidos en suspensión
- Tal como sucede en la aplicación de materia orgánica a los suelos, se describe una asimilación, llegándose a valores de DQO relativamente reducidos, que suelen corresponder, en los terciarios, a la materia orgánica muy refractaria a la degradación. En el caso del sistema secundario, el valor alcanzado permite el vertido a cauce público sin ningún problema. Esta degradación es atribuible a la acción de la biopelícula sobre el agua que circula por el filtro y a la capacidad de renovar la fase gaseosa por aire atmosférico fresco rico en oxígeno. En las IPm que alcanzan profundidades de más de 1 m de material filtrante, la degradación puede asimilarse a lo que sucede en la zona por debajo de los suelos, en la que se puede llegar a dar un funcionamiento anaerobio que contribuye a la eliminación de la DQO gracias a la desnitrificación.
- Los mecanismos de transformación de nitrógeno desde formas reducidas a oxidadas son muy activos, aunque deben estudiarse en más detalle para garantizar su continuidad según los mecanismos de gestión. Este papel es atribuible a las condiciones aerobias predominantes durante la mayor parte del tiempo y a la acción de los microorganismos adecuados, tal como sucede en los suelos bien aireados. La pequeña parte del tiempo que el sistema permanece en anaerobiosis o anoxia (subsuelo o suelo inundado) contribuye a los mecanismos globales de eliminación del nitrógeno del agua. En general, se acepta que la biopelícula ejerce una acción sobre los nutrientes, fijándolos o transformándolos, como en los suelos. En las ocasiones en que los filtros se colmatan, se ha podido observar que la transformación a nitratos desaparece prácticamente, aumentando la desnitrificación si se dan las condiciones adecuadas
- Por lo que respecta a la desinfección hay que señalar que tal como sucede en los suelos, una parte de la eliminación es debida a la retención de los sólidos en suspensión que albergan una gran cantidad de microorganismos; la otra a los procesos propios de desinfección que en suelos son los de predación, competencia microbiana y muerte natural. Aunque los valores encontrados difieren según sea el tratamiento secundario o terciario, se puede garantizar una buena eliminación de coliformes fecales. Por lo que respecta a los bacteriófagos, hay menos datos y la efectividad parece menor. De todas formas, su comportamiento en los suelos difiere del de las bacterias (coliformes, por ejemplo) por su tamaño y condiciones externas de carga eléctrica (fenómenos de adsorción/desorción). La eliminación es mayor cuando el sistema trabaja como secundario; lo cual es lógico.

Como consecuencia, la gestión de estos sistemas debe basarse, tal como acontece en la agricultura, en el mantenimiento durante la mayor parte del tiempo de condiciones aerobias, lo que permite una mayor velocidad de la mayor parte de mecanismos propios del tratamiento avanzado del agua.

6. CONCLUSION

La IPm como método de tratamiento secundario o terciario:

- Genera efluentes con una reducción considerable de los sólidos en suspensión, llegándose a niveles de no detección. Esta característica es muy importante en reutilización, puesto que permite que las

desinfecciones posteriores tengan rendimientos excelentes, siendo especialmente indicada para la radiación ultravioleta.

- Reduce de forma muy importante la cantidad de materia orgánica, permitiendo el vertido o la reutilización del agua regenerada y reduciendo los problemas asociados a la formación de biopelículas en los sistemas de distribución y la de sedimentos en los sistemas de almacenaje.
- Permite la transformación del nitrógeno reducido a formas oxidadas que reducen el impacto del vertido y facilitan tratamientos posteriores del agua.
- Consigue por sí misma una desinfección (eliminación de coliformes fecales, bacteriófagos y huevos de nematodo) que constituye una barrera importante para la reducción del riesgo asociado a la reutilización de agua regenerada.

Es preciso ajustar los modelos de gestión de este sistema de tratamiento, estableciendo una metodología clara de explotación que tenga en cuenta básicamente:

- La calidad del agua de alimentación.
- El sistema de aplicación de agua.
- Los modelos de aplicación en el tiempo (secuencias y períodos de reposo).

Dados los mecanismos que se emplean, la IPm ejerce una acción de degradación sobre diversos microcontaminantes orgánicos resistentes a los sistemas convencionales de depuración, aunque para garantizarlo se requieren estudios más detallados.

Por último hay que señalar que quizá el mayor inconveniente de la IPm sea la superficie necesaria, aunque sus beneficios compensen esta desventaja.

Agradecimientos. Los autores agradecen la colaboración de los técnicos de SEARSA (actualmente AQUAGEST Medio Ambiente), Acciona Agua, EPSAR y Aigües de la Costa Brava (EMACBSA). Todos los datos presentados han sido objeto de publicaciones previas que se citan. Este artículo está dedicado al Profesor Brissaud, que falleció durante su preparación.

REFERENCIAS

- Auset, M. 2002 Approche des mécanismes de décontamination en Infiltration-percolation. Tesis doctoral en Farmacia por la Universidad de Barcelona.
- Bancolé, A., F. and T. Gnagne 2003. Oxidation processes and clogging in intermittent unsaturated infiltration. *Wat. Sci. Tech.* 48(11/12), 139-146.
- Brissaud, F. y C. Joseph, 1989. Le Géoassainissement. *Géologues*, 85-86 : 77-82.
- Brissaud, F., M. Restrepo Bardon, M. Soulié & C. Joseph, 1991. Infiltration percolation for reclaiming pond effluents. *Wat. Sci. Tech.* 24(9): 185-193.
- Brissaud, F. & J. Lesavre, 1993. Infiltration percolation in France: 10 years experience. *Wat. Sci. Tech.* 28(10): 73-81.
- Folch, M 1999 Tratamiento terciario de aguas residuales por Infiltración-percolación: parámetros de control. Tesis doctoral en Farmacia por la Universidad de Barcelona
- Folch M., Salgot M. i Huertas E. 2001. Combinación de tecnologías no convencionales en el tratamiento de aguas residuales de pequeña comunidades: Els Hostalets de Pierola. VII Simposio de hidrología. Murcia. Mottier, V., Brissaud, F., Nieto, P. & Z. Alamy, 2000. Wastewater treatment by infiltration percolation : a case study. *Wat. Sci. Tech.* 41(1) :77-84.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero, 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- J. Romero, F. Ventura, M. Folch, M. Salgot, A. Torrens 2001. Characterisation of volatile organic contaminants alter different pretreatment systems in reclaimed wastewater. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3 (4), p. 139-143.
- Vedry, B., Gousailles, M., Affholder, A., Lefaux, A. and Bontoux, J. 2001. From sewage water treatment to wastewater reuse. One century of Paris sewage farms history. *Wat. Sci. Tech.* 43(10), 101-107.