



Regeneración de aguas residuales con filtro intermitente de arena previamente depuradas mediante lagunaje y humedales artificiales

Manuel Enrique López Sepúlveda investigador del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente en la Universidad de Cádiz (UCA)
Juan José Salas Rodríguez coordinador de área del Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA)
José María Quiroga Alonso catedrático del Área de Tecnologías del Medio Ambiente en la Universidad de Cádiz (UCA)

Los filtros intermitentes de arena han sido utilizados para regenerar, y posteriormente reutilizar, efluentes provenientes de lagunas de maduración (WSP) y de diferentes tipos de humedales artificiales. El estudio de regeneración se divide en dos fases. En la primera se utilizó como alimentación para la regeneración el agua depurada procedente de un sistema de lagunaje. La regeneración se realizó mediante cuatro filtros intermitentes de arena (FIA) a escala de laboratorio. Para la segunda fase de regeneración se usó un filtro a escala piloto y agua depurada procedente del lagunaje y de los humedales artificiales. Los resultados obtenidos mostraron rendimientos en la eliminación de la turbidez y de los sólidos en suspensión mayores del 95%, mientras que para los *E. coli* se superó el 99% del rendimiento en algunos casos, lo que posibilita su uso en muchas de las aplicaciones recogidas en el RRD de reutilización.

Palabras clave

Regeneración, reutilización, pequeñas comunidades, filtros intermitentes de arena, lagunaje, humedales artificiales.

Reclaim of wastewater with intermittent sand filters previously treated by pond system and artificial wetlands

*Intermittent sand filters have been used to reclaim and subsequently reuse effluents from maturation ponds (WSP) and different types of artificial wetlands. Regeneration study was divided into two phases. The first treated water for reclaim was from a pond system, was performed using four intermittent sand filters (ISF) laboratory scale. For the second phase was used at pilot scale ISF and reclaim water from the lagoons and constructed wetlands. Performance removing turbidity and suspend solids was higher than 95% and in some cases exceeded 99% in *E. coli*, making it suitable for use in many of the applications in Spanish normative of reuse.*

Keywords

Reclaim, reuse, small communities, intermittent sand filters (ISF), pond system, artificial wetlands.



1. Introducción

A la hora de depurar las aguas residuales en las pequeñas poblaciones (menos de 2.000 habitantes equivalentes -he-) no hay unas especificaciones claras de cuáles son los límites de vertido de estas. Así, tanto la Directiva 91/271/CEE, como el Real Decreto (RD) 11/1995 solo habla de la necesidad de un tratamiento adecuado: "El tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante cualquier proceso o sistema de eliminación, en virtud del cual las aguas receptoras cumplan después del vertido los objetivos de calidad previstos en el ordenamiento jurídico aplicable".

Es en estas poblaciones en las que se suelen aplicar las llamadas tecnologías no convencionales y extensivas de depuración (Salas, 2007), las cuales se basan en sistemas de bajo consumo energético y fácil mantenimiento. Entre las diferentes tecnologías existentes, últimamente están cobrando interés los sistemas de lagunaje y los humedales artificiales. Estas tecnologías intentan, en cierta manera, imitar los procesos depurativos que se dan en las masas de agua (lagunaje) o las zonas húmedas de rivera y pantanos (humedales artificiales), aunque de manera controlada (Ortega *et al.*, 2010).

Una vez depuradas las aguas estas pueden verterse a los cauces o bien ser reutilizadas para distintos fines. En el caso de que se opte por la reutilización, en España existe una normativa específica, RD 1620/2007 de 7 de diciembre, en el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas y que se debe tener en cuenta. En dicha ley se detalla cuáles pueden ser los usos (urbanos, agrícolas, industriales, recreativos y ambientales) y las características fisicoquímicas del agua a reutilizar para cada uno de ellos, independientemente del origen del

agua y de su población equivalente. También contempla una serie de restricciones al empleo del agua regenerada (Artículo 4, párrafo 4).

Teniendo en cuenta las limitaciones económicas y de personal que hay en las pequeñas poblaciones (Molinos-Senante *et al.*, 2012), la reutilización de las aguas en estos núcleos de población se verá limitada por estos aspectos. Por ello, los sistemas de regeneración deben cumplir similares características a los de depuración: asequibles económicamente, robustos y de bajo mantenimiento. Entre los sistemas que cumplen estos requisitos están los filtros intermitentes de arena (FIA) (Neder *et al.*, 2002).

Tradicionalmente, los filtros intermitentes de arena han sido empleados como sistemas secundarios de depuración (Ortega *et al.*, 2010), si bien empiezan a desarrollarse como sistemas terciarios no existiendo concordancia entre los distintos parámetros de su diseño, dado que se han realizado en diversas condiciones. Así, la granulometría de la arena es muy variable, con unos diámetros efectivos (d_{10} : diámetro del 10% de las partículas de la arena) entre 0,19 mm (Torrens *et al.*, 2009) y 1,1 mm (Tanner *et al.*, 2012); unos coeficientes de uniformidad (C_u : d_{10}/d_{60}) también muy dispares, de entre 2,57 (Rolland *et al.*, 2009) a 9,3 (Torrens *et al.*, 2009). También hay discrepancias con respecto al espesor de la capa filtrante, que para algunos autores basta con 25 cm (Rodger *et al.*, 2004) y otros llegan hasta los 81 (Tanner *et al.*, 2012). Las diferencias con la dosificación también son elevadas, cubriéndose un abanico muy extenso, desde las 4 (Rodger *et al.*, 2004) hasta las 32 (Torrens *et al.*, 2009). Con la carga aplicada, tanto hidráulica como de DQO, los valores también son muy amplios, oscilando desde los 6,7 L/m²/d (Rodger *et al.*,

2004) hasta los 800 L/m²/d (Torrens *et al.*, 2009) para las hidráulicas y entre los 17 y los 170 g/m²/d (Torrens *et al.*, 2009) para las de DQO.

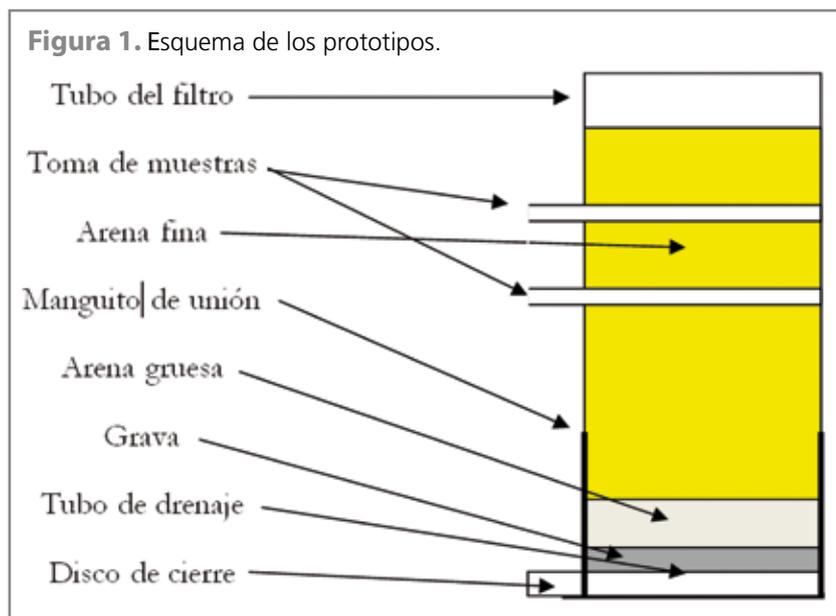
Teniendo esto en cuenta, los rendimientos en la operación de filtrado que se encuentran en bibliografía también son muy heterogéneos, y parece que dependen de la mayoría de los factores mencionados anteriormente. Así, Torrens *et al.* (2009), con una granulometría fina (d_{10} : 0,19) pero heterogénea (C_u : 9,3), con un espesor de 65 cm y cargas hidráulicas muy variables, alcanza rendimientos cercanos al 50% en DQO y roza el 70% en el caso de los sólidos en suspensión totales (SST). Por su parte, Rolland *et al.*, (2009) emplea dos tipos diferentes de arena, una más fina que otra con un d_{10} de 0,33 y 0,8 mm respectivamente, pero igual en el resto de parámetros, tuvieron rendimientos muy desiguales: en DQO, 96 y 66%, y en SST, 93 y 67% respectivamente.

Ante esta dispersión de resultados y que aún no se han descrito trabajos en la bibliografía en la que se utilicen los FIA para la regeneración de aguas residuales previamente tratadas con sistemas de depuración no convencionales, y en concreto con sistemas de lagunaje y humedales artificiales, y al objeto de tratar de establecer las condiciones más adecuadas de operación de estos, en el presente trabajo se han analizado y estudiado diferentes condiciones de operación de los filtros intermitentes de arena al objeto de poder utilizarlos como sistema para la regeneración de aguas residuales.

2. Materiales y métodos

2.1. Sistemas de depuración utilizados

Este estudio se ha realizado en la Planta Experimental de Carrión de



los Céspedes (PECC), perteneciente a la fundación CENTA en la provincia de Sevilla, que cuenta entre sus instalaciones con muchos de los sistemas de depuración de aguas residuales no convencionales que existen.

Para los ensayos de filtración a escala de laboratorio se empleó agua proveniente del sistema de lagunaje de la planta, el cual está compuesto por una laguna anaerobia de 200 m³, una laguna facultativa de 3.500 m³ y una de maduración de 400 m³ de volumen útil.

En el segundo ensayo, a escala piloto, se empleó tanto el agua procedente de la laguna de maduración anterior, como la proveniente del sistema de humedales artificiales. El sistema de humedales de la PECC está compuesto por seis hu-

medales artificiales: 3 humedales horizontales (HH), 2 humedales verticales (HV) y un humedal de flujo libre (HFL), agrupados de dos en dos de la siguiente manera: HV-HH; HH-HV; HV-HFL. Los efluentes de los tres grupos vertían en la misma arqueta y desde esta se enviaba el agua al filtro.

2.2. Diseño de los prototipos de laboratorio para la regeneración

Para los ensayos de filtración en el laboratorio se construyeron 4 filtros exactamente iguales, consistente cada uno de ellos en un tubo de PVC de 20 cm de diámetro exterior y de 70 cm de altura. Cada tubo se introdujo en el interior de un manguito provisto de un desagüe lateral. Para cerrar el manguito, por la parte infe-

rior, se colocó un disco de PVC de 3 mm de espesor. El drenaje de salida de los filtros fue realizado mediante una tubería de 40 mm de diámetro al cual se le realizaron una serie de cortes transversales para facilitar la salida del agua. En la **Figura 1** se observa el esquema de estos prototipos.

El relleno de los cuatro filtros fue realizado colocándose 5 cm de grava fina de 8 mm sobre el fondo del filtro. A continuación se superpuso otra capa de 5 cm de arena gruesa de unos 3 mm de diámetro. Por último se colocaron 65 cm de la arena filtrante (d_{10} : 0,27 mm; C_u : 1,77).

Como se ha comentado, el agua utilizada para alimentar los filtros procedía de la laguna de maduración de la PECC, de la que se tomaban aproximadamente 100 L todos los días. Este volumen de agua era introducido en un depósito que se utilizaba para la alimentación de los 4 sistemas de filtración. Diariamente se renovaba el agua del depósito de alimentación a la filtración para evitar su envejecimiento.

2.2.1. Caudales y carga de trabajo de los prototipos

En cada filtro se realizaron ensayos con diferentes caudales (60, 120, 180, 204 y 480 L/m²/d) y una duración que osciló entre 4 y 5 semanas cada ensayo (**Tabla 1**), por lo que todo el experimento duró 5 meses aproximadamente. La diferencia entre cada filtro fue el número de dosificaciones que se hacían a cada

Tabla 1. Etapas de trabajo de los prototipos.

Caudal (L/m ² /d)	Volumen añadido (L/d)	Carga de DQO (gr O ₂ /m ² /d)	DQO aplicada (gr O ₂ /d)	Semanas
60	2	11,4	0,34	4
120	4	27,3	0,91	5
180	6	35,1	1,16	4
240	8	81,5	2,71	4
480	16	138,9	4,63	4



uno. Así, al primero se hizo una dosificación diaria, al segundo filtro 12, al tercero filtro 24 y al cuarto filtro 8 dosificaciones. El ciclo de alimentación y de descanso era de 5 días de alimentación y dos de descanso para los 4 filtros en todos los experimentos.

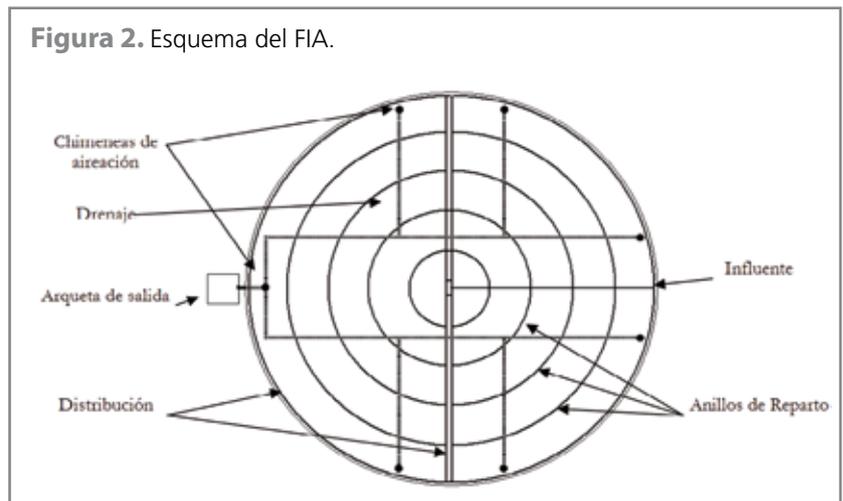
El caudal inicial de 60 L/m²/d día corresponde al dato bibliográfico medio de alimentación de los filtros intermitentes cuando funcionan como sistema de depuración secundario (Crites *et al.*, 2000). Después se fue aumentando el caudal progresivamente hasta los 480 L/m²/d para observar la influencia de esta variación en el efluente de los distintos filtros.

En este primer ensayo los parámetros que se analizaron a la salida del agua del filtro fueron: sólidos en suspensión totales, turbidez, DQO, *E. Coli*, nitrógeno amónico, nitrógeno nitrato y fósforo total siguiendo los procedimientos estándar (APHA, 1999).

2.3. Diseño del filtro a escala piloto

Para los ensayos de regeneración a escala piloto se empleó un filtro de 5 m de diámetro y 1,1 m de altura con una superficie de 19,6 m² (Figura 2). Se variaron tanto los caudales como la dosificación en condiciones climáticas reales, así como el régimen de alimentación y descanso del mismo. Este segundo ensayo tuvo una duración de 23 meses.

La distribución y el reparto tenían forma circular, empleándose para su construcción tubería de polietileno de 42 mm de diámetro. La distribución se realizó a través de dos tuberías diametrales paralelas y un anillo exterior. El influente se introducía en dos puntos diferentes: uno en el anillo exterior y otro en la doble tubería diametral; de esta forma se igualaba la presión en todo el sistema.



El reparto de agua se realizó mediante los 8 semicírculos interiores, separados entre sí 50 cm, y conectados a las dos tuberías diametrales de distribución. Estos anillos fueron perforados con agujeros de 5 mm de diámetro, cada 35-40 cm. A la salida de los agujeros se colocaron baldosas cerámicas a fin de evitar una erosión excesiva en la superficie del filtro.

Para el drenaje del filtro se utilizó un tubo de PVC de 110 mm de diámetro, al que se le practicaron cortes transversales de aproximadamente 10 cm de largo por 3 mm de ancho, separados 10 cm unos de otros. Se colocaron chimeneas de aireación por el perímetro del filtro en los extremos de los tubos.

Para el relleno del filtro se utilizó como soporte drenante 3 m³ de grava gruesa de 18 mm. La altura de la capa de grava fue de 15 cm. Como elemento filtrante se utilizó el mismo tipo de arena que en los prototipos, empleándose 27 m³ de arena.

Para este ensayo se emplearon dos tipos de influente, el primero procedente del sistema de lagunaje, con el que se había experimentado anteriormente con los prototipos, y el segundo proveniente del sistema de humedales, del que se utilizó la mezcla de los tres grupos de humedales que vertían a la misma arqueta.

2.3.1. Caudales y carga de trabajo del filtro piloto

A partir de los datos obtenidos con los prototipos, en los filtros piloto se realizaron una segunda serie de experimentos en condiciones más realísticas. En este caso, el agua se bombeaba directamente desde la laguna o desde la arqueta de los humedales. Las características de cada experimento se encuentran detallada en la **Tabla 2**.

Las cargas hidráulicas de 40, 60 y 80 con agua de lagunaje se realizaron para estabilizar el filtro y comprobar su eficacia a escala real. Estos valores se corresponden, además, con los caudales típicos en los que se utiliza el FIA cuando funcionan como sistema de depuración secundario (Crites *et al.*, 2000). Las que van desde 120 a 480 l/m²/d se emplearon para contrastar los resultados obtenidos con los prototipos.

Las cargas hidráulicas de 600 a 800 l/m²/d con el agua procedente de los humedales se establecieron para comprobar su eficacia a elevadas cargas hidráulicas.

En este segundo ensayo a escala piloto, los parámetros analizados fueron: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos en suspensión totales, turbidez, DBO₅, DQO, *E. Coli*, nitrógeno amónico, nitróge-

Tabla 2. Etapas de trabajo del FIA.

FIA	Carga hidráulica (L/m ² /d)	Dosificación (dosis/día)	Carga de DQO (gr DQO/m ² /d)	Carga de DBO ₅ (gr DBO ₅ /m ² /d)	Relación alimentación/descanso	Duración (semanas)
Lagunaje	40	8	7,12	2,11	5 / 2	12
	60	8	8,08	2,87		12
	80	16	11,06	2,98		12
	120	12	27,3	8,9	7 / 0	12
	240	12	52,2	20,6		12
	480	12	67,8	22,0		8
Humedales	240	12	10,9	3,6		4
	480	12	28,0	4,4		5
	600	12	37,3	13,0		6
	800	12	60,96	10,9		8

no nitrato y fósforo total siguiendo los procedimientos estándar (APHA, 1999).

2.4. Procesado de datos

Para el análisis de los valores obtenidos de los distintos parámetros mencionados, las posibles relaciones entre ellos y sus variaciones con respecto a la carga hidráulica y dosificación, se han empleado una metodología basada en estudios estadísticos descriptivos e inferenciales. Para estos últimos se emplearon el coeficiente de correlación de Spearman y el análisis de la varianza de Bonferroni, estableciendo el nivel de significación estadística en $p < 0,05$. Para ello se utilizaron los programas SPSS y el Statistica 6.0.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis del Influyente a las unidades de filtración

El RD 509/1996 de 15 de marzo en el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, recoge las concentraciones máximas que deben cumplir para su vertido las aguas residuales depuradas: DQO (125 mg

O₂/l), DBO₅ (25 mg O₂/l) y sólidos en suspensión totales (35 mg/l). Para la primera etapa de estudio, ensayo a escala de laboratorio, se empleó exclusivamente agua procedente del sistema de lagunaje. Las características más importantes de las aguas residuales tratadas mediante el sistema de lagunaje se recogen en la **Tabla 3**. Estos valores se corresponden con valores medios obtenidos a partir de las bases de datos de la Fundación CENTA durante un periodo de tres años.

Si se comparan estos valores con los del RD 509/1996 se puede constatar que el agua procedente del lagunaje no cumple con alguno de estos valores, por lo que no podría ser vertida a cauce público. Solo cumplen los valores de SST en lo que se refiere al RD 509/1996 de vertidos para la depuración con lagunaje (150 mg/l en vez de 35 mg/l) y en rendimiento de la DBO₅. No obstante, es necesario recordar en este punto lo comentado anteriormente sobre los vertidos procedentes de pequeños núcleos de población: "El tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante cualquier proceso o sistema de eliminación, en virtud

del cual las aguas receptoras cumplan después del vertido los objetivos de calidad previstos en el ordenamiento jurídico aplicable".

Se trata, pues, de una tecnología robusta, de muy bajo mantenimiento, pero al mismo tiempo muy dependiente de la climatología y que necesita de una elevada superficie por habitante equivalente para su implantación, en torno a 5 m²/he.

Para la segunda etapa de este estudio, el ensayo a escala piloto, se empleó tanto el agua procedente del mencionado sistema de lagunaje como el procedente de los humedales. Las características principales del agua procedente de los humedales obtenidas a partir de las bases de datos de la Fundación CENTA durante un periodo de tres años, se encuentran recogidas en la **Tabla 4**.

Del estudio de caracterización del agua de los humedales se puede concluir que estos son más eficaces que el lagunaje y necesitan menos espacio por habitante equivalente. Por el contrario, necesitan de un mayor mantenimiento y control, debido, sobre todo, a la posible colmatación de los humedales horizontales.

Cabe destacar el bajo manteni-


Tabla 3. Calidad media del sistema de lagunaje.

Sistema lagunaje		pH	O ₂ mg/L	Turbidez NTU	SST mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	E. Coli UFC/100 mL (u log)	Huevos de helminto (h/10 L)
Laguna de maduración II	Media	8,34	5,14	45,42	69,21	51,49	175,54	3,38	0
	Desviación	0,67	4,88	31,39	44,36	23,54	50,04	3,63	0

Tabla 4. Calidad media del sistema de humedales.

Sistema humedales		pH	O ₂ mg/L	Turbidez NTU	SST mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	N-NH ₄ mg/L	N-NO ₃ mg/L	P total mg/L	E. Coli UFC/100 mL (u log)
Humedales	Media	7,34	3,26	35,67	27,79	13,47	54,64	10,88	2,64	4,05	3,32
	Desviación	0,34	3,96	47,33	69,67	8,91	44,58	6,42	4,19	3,07	3,72

Tabla 5. Resumen del Anexo I del RD 1620/2007.

Usos	Calidad	Nematodos intestinales (huevos/10 L)	Escherichia coli (UFC/100 mL)	Sólidos en suspensión totales (mg/L)	Turbidez (NTU)
Urbano	1.1	1	0	10	2
	1.2	1	200	20	10
Agrícola	2.1	1	100	20	10
	2.2	1	1.000	35	-
	2.3	1	10.000	35	-
Industrial	3.1	-	10.000	35	15
		1.000	35	-	
	3.2	1	0	5	1
Recreativos	4.1	1	200	20	10
	4.2	-	10.000	35	-
Ambientales	5.1	-	1.000	35	-
	5.2	1	0	10	2
	5.3	-	-	35	-
	5.4	-	-	-	-

miento de estas tecnologías de depuración, sobre todo la del lagunaje, que se reduce a la aparición de materia flotante y *blooms* de algas. En cambio, los humedales necesitan un mayor trabajo, puesto que anualmente deben ser 'cosechados' y los humedales horizontales tienden a colmatarse irremediablemente con el paso del tiempo. También el sistema de lagunaje necesita una mayor superficie por he que los humedales, la cual está en torno a 2 m²/he.

Para poder reutilizar las aguas procedentes de ambos sistemas de tratamiento de forma directa, sin necesidad de tratamientos terciarios, deberán cumplir con los valores del Anexo I del RD 1620/2007 sobre reutilización, y que aparecen recogidos en la **Tabla 5**. Respecto al RD de reutilización, en el caso de las aguas procedentes del sistema de lagunaje, el uso directo queda limitado al 5.4., en el cual es la autoridad competente la que marca el mínimo de cali-

dad. Con respecto a los humedales artificiales y su reutilización directa, estos generalmente cumplen con la normativa de vertidos e incluso, con algunos de los usos menos restrictivos que especifica el RD 1620/2007 de reutilización, entre ellos los usos 2.3, 4.2, 5.3 y 5.4, por ser estos los menos restrictivos. Para otros usos, y dependiendo del que se les vaya a destinar, sería necesario disminuir las concentraciones de determinados contaminantes.

Tabla 6. Resultado de los prototipos de laboratorio por caudales. Nota: In = influente al filtro; Av = media; y SD = desviación estándar.

Caudales		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO (mg/L)			NH ₄ (mg/L)			E. Coli UFC/100 mL (u log)		
		Av	SD	%	Av	SD	%	Av	SD	%	Av	SD	%	Av	SD	%
60 L/m ² /d	In	48,0	17,8		54,7	22,3		189,9	52,1		25,3	3,1		2,6	2,6	
	F1	11,8	4,9	75,4	13,2	5,9	75,9	74,2	38,8	60,9	5,8	7,2	77,1	2,3	2,2	50,8
	F2	4,2	3,2	91,2	5,3	5,6	90,3	46,8	24,9	75,4	2,9	4,5	88,6	0,8	0,4	98,4
	F3	2,7	1,2	94,3	2,8	1,4	94,9	44,5	19,4	76,6	3,8	5,9	84,9	0,8	0,3	98,5
	F4	3,7	2,0	92,4	4,3	3,7	92,2	46,6	21,9	75,5	3,8	5,9	85,0	0,7	0,0	98,7
120 L/m ² /d	In	92,1	79,9		118,5	78,5		227,6	82,9		7,8	4,0		3,0	3,2	
	F1	20,2	11,8	78,0	28,7	14,1	75,8	85,2	12,5	62,6	0,1	0,2	98,2	2,7	2,8	55,0
	F2	4,0	1,6	95,7	4,1	1,2	96,6	41,0	8,7	82,0	0,0	0,1	99,5	0,8	0,4	99,4
	F3	3,6	1,7	96,2	4,6	2,0	96,1	38,6	6,8	83,1	0,1	0,1	99,4	0,8	0,7	99,5
	F4	5,0	1,9	94,6	5,0	1,7	95,8	38,4	7,6	83,1	0,1	0,1	99,2	0,7	0,5	99,5
180 L/m ² /d	In	45,5	31,4		77,0	58,6		194,7	50,9		10,3	3,9		1,7	1,7	
	F1	14,3	6,4	68,7	15,2	8,1	80,3	93,8	25,7	51,8	1,1	0,8	89,8	1,5	1,6	42,8
	F2	3,8	0,9	91,7	3,5	1,2	95,5	36,5	4,3	81,2	0,1	0,1	99,1	0,9	0,8	84,1
	F3	2,6	0,8	94,4	3,2	1,4	95,8	39,0	5,1	80,0	0,6	0,9	94,5	0,8	0,3	89,3
	F4	3,6	1,8	92,2	2,8	1,3	96,3	36,2	11,2	81,4	0,1	0,2	99,2	0,9	0,4	86,6
240 L/m ² /d	In	71,0	16,6		194,6	147,7		339,4	119,8		13,8	6,8		3,0	3,3	
	F1	8,6	5,1	87,9	8,6	7,2	95,6	88,0	27,2	74,1	1,3	1,7	90,4	2,2	2,2	86,4
	F2	5,9	1,2	91,7	4,0	1,4	97,9	51,4	4,8	84,9	0,1	0,1	99,6	0,7	0,7	99,5
	F3	6,5	1,1	90,8	4,8	1,3	97,5	52,4	3,5	84,6	0,1	0,2	99,4	0,7	0,7	99,5
	F4	7,4	2,6	89,6	5,8	2,8	97,0	47,0	5,6	86,2	0,1	0,2	99,0	0,9	0,7	99,3
480 L/m ² /d	In	99,8	11,2		130,0	40,0		289,5	121,7		8,4	3,3		2,1	1,8	
	F1	25,7	6,5	74,3	16,8	6,3	87,1	134,0	32,4	53,7	3,0	1,9	64,3	2,0	2,2	21,9
	F2	6,7	1,5	93,3	4,0	0,8	96,9	60,0	7,9	79,3	0,1	0,1	98,8	0,4	0,4	98,1
	F3	7,8	0,9	92,2	5,0	1,8	96,2	124,5	120,6	57,0	0,1	0,1	99,1	0,2	0,4	98,5
	F4	6,6	0,8	93,4	6,8	1,7	94,8	56,0	13,9	80,7	0,3	0,4	96,4	0,0	0,0	100,0

3.2. Evolución de los prototipos de laboratorio

En la **Tabla 6** se encuentran recogidos los valores de las principales variables analizadas en el influente y los efluentes de los 4 prototipos de filtros utilizados y para cada caudal de entrada estudiado. Del análisis detallado de la **Tabla 6** se puede observar

la mejora de la calidad del agua que supone el tratamiento con los filtros, superando el efluente el 90% del porcentaje de eliminación de la mayoría de los parámetros analizados, independientemente del número de dosificaciones realizadas y de la carga hidráulica que se haga circular por el filtro, excepto para el F1 en el

que se obtienen peores resultados. Así, para los sólidos en suspensión totales y turbidez, el porcentaje de eliminación se situó por encima del 90% excepto en el Filtro 1 lo cual es lógico teniendo en cuenta el tipo de contaminantes que se trata y la tecnología aplicada. Para la eliminación de DQO superan por lo general el

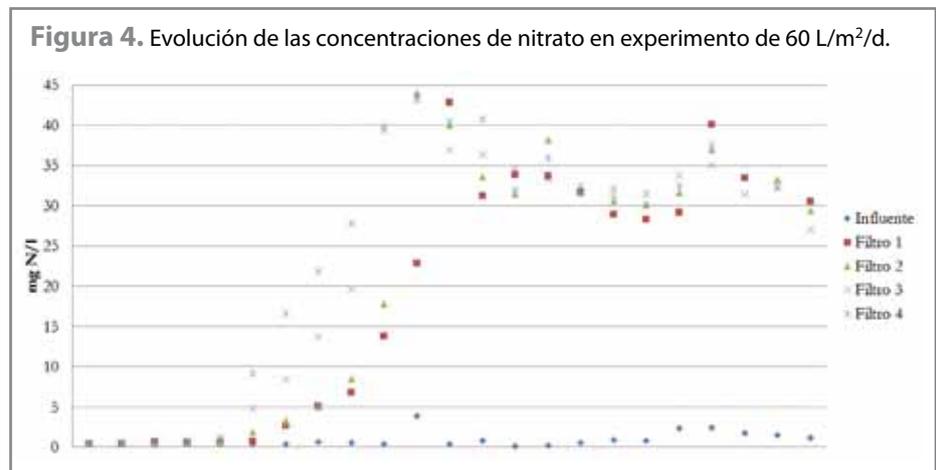
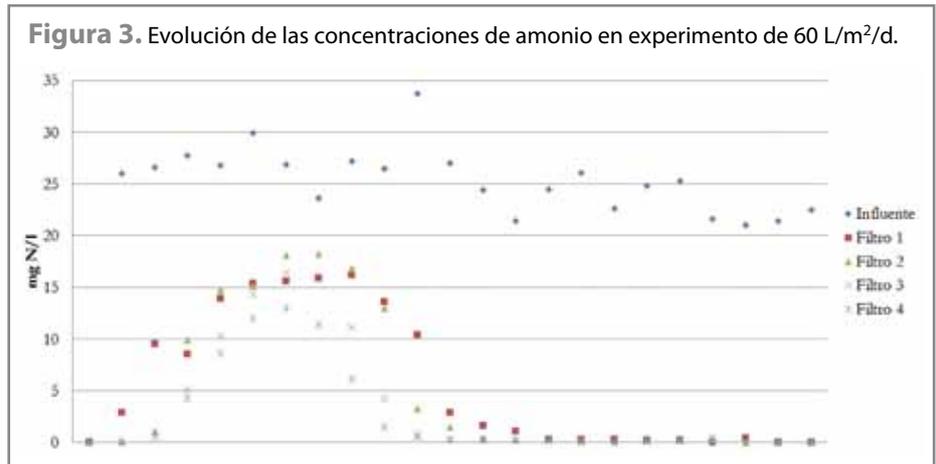


75% de eliminación llegando en algunos casos hasta un 86%, excepto otra vez el F1 en que los porcentajes son menores (entorno al 50%). Es necesario considerar que esta DQO que se elimina es fundamental DQO particulada pues la soluble pasa a través del filtro. Con respecto al abatimiento de *E. coli*, la eliminación en los filtros dosificados, alcanza valores por encima del 85% y en muchos casos por encima del 95%.

Para el caso de la eliminación de amonio, el proceso de nitrificación comienza a ponerse de manifiesto a partir del quinto día de alimentación a los filtros, estableciéndose completamente a los 10-11 días y siendo prácticamente independiente de la dosificación. Una vez establecida la nitrificación, alcanza una eliminación superior al 95%. El comportamiento anómalo del amonio en el caudal de 60 L/m²/d queda también recogido en las **Figuras 3 y 4**, en las que se muestra las concentraciones obtenidas en los análisis diarios, tanto del amonio como del nitrato, y es debido al inicio de la nitrificación.

En la **Figura 3** puede apreciarse cómo en los primeros días se realiza una eliminación del amonio por adsorción, perdiendo esta capacidad al cabo del tiempo. Posteriormente y después de un aumento por pérdida de la capacidad de adsorción, vuelve a disminuir la concentración, debido a la eliminación del amonio por la nitrificación.

En la **Figura 4** puede observarse cómo la concentración de nitrato que llega del influente es mínima, y cómo, a partir del séptimo día, empieza a desarrollarse la nitrificación a partir del amonio hasta que se estabiliza y se hace dependiente del valor de concentración de amonio del influente. A este valor de nitrato en la salida hay que sumar el aporte de nitrógeno de otras fuentes como



aminoácidos, proteínas, etc. (Cooper, 2001).

Este comportamiento descrito en las **Figuras 3 y 4** se da de forma similar en los 4 filtros, aunque con cierta dependencia de la dosificación: más lenta con una sola dosificación, más rápido con 8 dosificaciones y prácticamente igual con 12 que con 24.

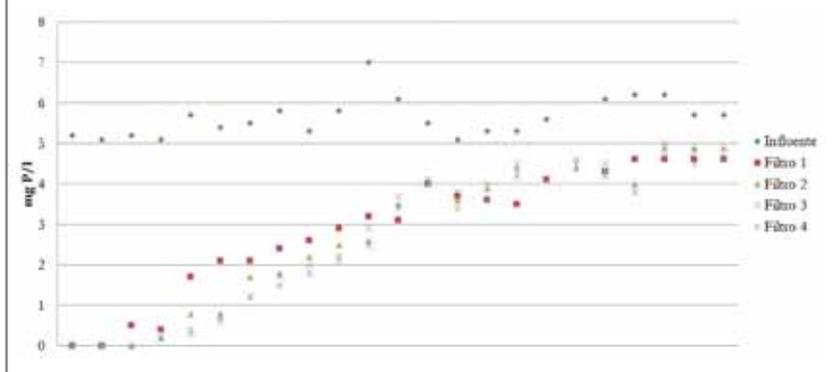
La eliminación de fósforo depende, casi exclusivamente, de las propiedades de la arena para la adsorción de este elemento, y poco o nada de la dosificación de la alimentación. Al poco tiempo de funcionamiento de los filtros, la concentración de fósforo en el efluente de los filtros es la misma que en el influente. La eliminación de fósforo, tal y como puede apreciarse en la **Figura 5**, es mayoritariamente por adsorción, aunque

en este caso es prácticamente independiente de la dosificación.

Respecto a las variables estudiadas, y en lo que se refiere a la influencia de la dosificación con las que operan los filtros intermitentes de arena en la calidad del efluente, esta solo se pone de manifiesto cuando al filtro se le aplica el agua una sola vez al día, en cuyo caso la calidad del agua empeora respecto a las demás (8, 12 y 24) en las que las diferencias no son significativas.

Respecto a la carga hidráulica, en la **Tabla 6** se puede observar que su aumento tampoco afectó en exceso a la calidad del efluente de los filtros, excepto en el caso del F1 (una única dosificación al día) en el que los porcentajes de reducción son claramente inferior al resto. El aumento de caudal de hasta 8 veces, no resulta tan

Figura 5. Evolución de las concentraciones del fósforo total en experimento de 60 L/m²/d.



relevante como se esperaba a priori, obteniéndose los mejores resultados para cargas de 120 y 180 L/m²/d.

A la vista de estos primeros resultados, y a la espera de su confirmación en la planta piloto, se puede concluir que los filtros intermitentes de arena constituyen una eficaz tecnología de regeneración, con la que se pueden alcanzar calidades en los efluentes finales que permiten su empleo en prácticamente todos los usos contemplados en el RD 1620/2007 en los que no es necesaria una desinfección completa de la misma (uso urbano 1.1, uso industrial 3.2 y uso ambiental 5.1) o los que exigen bajos niveles de nitrógeno (usos ambientales 5.1 y 5.2) dado que no existe desnitrificación y prácticamente todo el nitrógeno se encuentra en forma de nitrato y de fósforo (uso recreativo 4.2 para aguas estancadas) debido a que una vez los filtros se saturan de fósforo, prácticamente el que entra es el que sale.

Se trata también de un sistema relativamente robusto por el pequeño margen de desviación que presenta en la mayoría de los resultados de las variables estudiadas, lo que facilita su uso en pequeñas poblaciones.

La aplicación de los métodos estadísticos a los parámetros analizados indican que existen diferencias significativas de la varianza (método

de Bonferroni) entre el filtro 1 y los otros tres, así como que no existen estas diferencias entre los tres filtros en ninguno de los destinos caudales. Existe una correlación estadística (método de Spearman) entre los sólidos en suspensión totales de los 4 filtros con la turbidez.

3.3. Ensayos de filtración en planta piloto

Una vez obtenidos los resultados a escala de laboratorio, se procedió a realizar experimentos a escala piloto usando un filtro de mayores dimensiones, durante un periodo más prolongado y empleando tanto aguas de lagunaje como de los humedales artificiales. Los resultados analíticos del FIA se resumen en la **Tabla 7**.

De un primer análisis de la **Tabla 7** se comprueba que los resultados obtenidos con el FIA fueron análogos a los que se obtuvieron con los prototipos, y que el empleo de cargas hidráulicas menores de 120 L/m²/d no reporta mejores resultados en la calidad del efluente del filtro cuando se trabaja con aguas procedentes del sistema de lagunaje. Por su parte, y con respecto también a las cargas hidráulicas aplicadas, los efluentes procedentes de la filtración del agua de humedales no presentaron un comportamiento demasiado diferente entre sí.

Por otro lado, los rendimientos de los filtros en la eliminación de contaminantes empleando aguas de diferentes orígenes son ligeramente superiores cuando se emplea agua del lagunaje que cuando se emplea agua procedente de los humedales. La razón de esta diferencia hay que buscarla en las diferentes cargas contaminantes que llegan a la unidad de filtración procedente de uno u otro sistema. Atendiendo los influentes a los filtros, se observa que los que llegan procedentes del lagunaje presentan una mayor carga contaminante como consecuencia del peor comportamiento en la depuración de este sistema que los humedales. Dado que los filtros tienen un buen comportamiento en la eliminación de estos contaminantes, al partir de valores de entrada mayores, los rendimientos en la eliminación son también mayores. No obstante, y a pesar de ser las aguas de los humedales de mejor calidad, el filtro consigue reducir aún más las concentraciones en valores absolutos aunque en porcentajes de reducción sean menores que las procedentes del lagunaje.

Otro aspecto importante que hay que destacar es que durante el periodo de ensayo en el filtro se dieron varios episodios de colmatación cuando se empleó agua del lagunaje. Estos episodios se dieron cuando se trabajó con cargas hidráulicas de 480 L/m²/d, y es lo que explica la caída en los rendimientos de la filtración al pasar de 240 a 480 L/m²/d en la carga hidráulica que se dosifica al sistema. En los humedales, por el contrario, y aun trabajando con cargas mayores no se dio ningún episodio de colmatación, lo que corrobora la mejor calidad del agua de los humedales. Otro aspecto que resulta interesante observar es que para la carga hidráulica de 480 L/m²/d los valores de la carga orgánica son


Tabla 7. Resultado de FIA por caudales y origen del Influyente. Nota: In = influente al filtro; Av = Media ; y SD = desviación estándar.

FIA		Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			DQO (mg/L)			NH ₄ (mg/L)			E. Coli UFC/100 mL (u log)			
		Av	SD	%	Av	SD	%	Av	SD	%	Av	SD	%	Av	SD	%	
Lagunaje	40 L/m ² /d	Inf	39,2	19,7		74,8	38,4		178,8	54,2					2,9	2,8	
		FIA	4,9	6,3	87,6	8,0	9,6	89,3	50,6	15,3	71,7				1,8	2,1	92,6
	60 L/m ² /d	Inf	28,1	7,6		64,3	28,2		146,8	44,1					3,0	3,0	
		FIA	2,1	1,8	92,6	8,4	12,7	86,9	42,4	23,7	71,1				1,4	1,4	97,7
	80 L/m ² /d	Inf	48,9	34,0		56,0	30,4		138,3	43,2					3,4	3,6	
		FIA	1,3	1,5	97,4	2,0	2,5	96,4	28,0	6,6	79,8				1,0	0,5	99,6
	120 L/m ² /d	Inf	61,6	16,6		81,5	22,7		227,9	22,6		5,9	2,3		2,4	2,6	
		FIA	0,7	0,3	98,9	0,8	0,5	99,1	43,2	24,2	81,1	0,6	0,3	89,9	1,0	-0,5	96,3
	240 L/m ² /d	Inf	70,0	73,4		102,0	70,1		217,5	79,3		20,9	4,9		2,6	2,5	
		FIA	5,7	13,9	91,9	4,8	10,7	95,3	47,7	46,6	78,1	2,7	4,7	87,0	1,7	2,1	86,5
	480 L/m ² /d	Inf	33,0	10,2		39,3	12,1		141,0	24,0		30,6	2,3		3,5	3,4	
		FIA	4,9	3,6	85,2	6,0	4,9	84,7	52,8	35,7	62,6	9,3	9,7	69,7	2,8	3,1	81,4
Humedales	240 L/m ² /d	Inf	8,3	3,2		8,8	4,0		45,5	19,0		21,0	4,9		3,2	3,0	
		FIA	1,6	0,6	80,7	1,3	0,5	84,9	22,5	18,2	50,6	0,4	0,6	98,3	0,9	0,5	99,5
	480 L/m ² /d	Inf	13,7	10,8		12,0	10,2		58,3	32,4		14,2	3,9		3,0	3,1	
		FIA	2,0	0,9	85,2	3,3	3,7	72,6	37,3	33,2	36,0	0,3	0,3	98,2	1,1	1,2	98,9
	600 L/m ² /d	Inf	18,6	9,7		20,3	13,5		62,3	13,7		16,2	7,5		2,9	2,8	
		FIA	1,9	1,1	89,9	6,0	8,7	70,4	30,3	2,2	51,4	0,2	0,3	98,6	1,4	1,3	97,3
	800 L/m ² /d	Inf	15,2	4,9		12,8	2,8		76,2	16,2		27,6	9,3		4,7	5,0	
		FIA	1,5	0,3	90,8	1,0	0,0	92,2	41,8	5,3	45,1	0,4	0,5	98,6	2,6	2,6	99,3

menores que los de carga hidráulica de 240 L/m²/d, lo que indica que la colmatación que se da en la superficie de los filtros es proporcional no solo a la carga hidráulica aplicada, sino también a la concentración en materia en suspensión que presentan las aguas a filtrar.

En la **Tabla 8** se encuentran especificadas las condiciones en las que se produjeron las colmataciones, así como el análisis de costra que se realizó.

Para evitar estos procesos de colmatación es necesario, además de controlar la carga de algunos contaminantes presentes en el agua y la carga hidráulica que se pasa por el filtro, la forma de adición de ésta. Así, el agua debe ser aplicada en to-

da la superficie lo más homogéneamente posible, pues la dispersión radial de la misma es relativamente baja. También es necesario tener en cuenta la nivelación tanto del seno del filtro como de la estructura del mismo para evitar la formación de caminos preferenciales

En la **Figura 6** se han representado los rendimientos de la **Tabla 7** con respecto a la temperatura del agua del influente. Cabe destacar la diferencia entre los rendimientos que se dan con el agua del lagunaje y los que se dan con respecto al agua de los humedales. También resulta significativa la caída del rendimiento en la eliminación de amonio, que pudiera también ser efecto de las bajas temperaturas. Si esto hubiera sido domi-

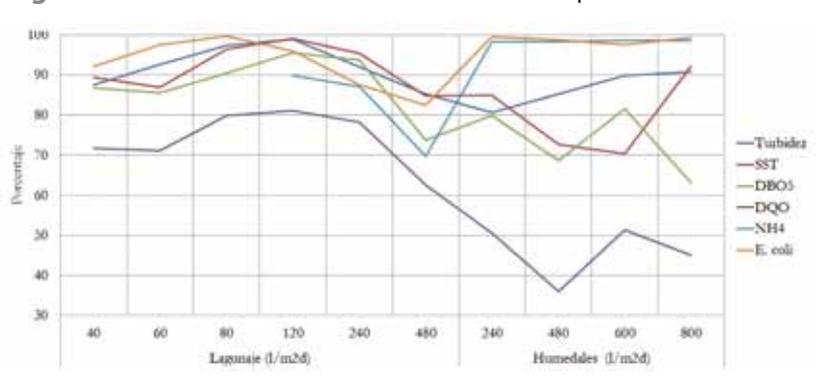
nante, tal efecto también se hubiera dado en el agua de humedales; por el contrario, esto no ocurrió así.

Con respecto a los periodos de alimentación/descanso, el paso de 5 días de alimentación y dos de descanso a 7 días ininterrumpidos de alimentación no fue significativo (paso de 80 a 120 L/m²/d con agua de lagunaje). Tampoco el número de dosificaciones (8, 12 y 16 dosificaciones, 60, 80 y 120 L/m²/d con agua de lagunaje, **Tabla 2**), resultaron determinantes en el porcentaje de eliminación de las variables estudiadas. La dosificación del filtro fue analizada mediante la variación de la altura del nivel de agua en la arqueta de salida con un vertedero en V de 90°. Con este análisis se preten-

Tabla 8. Análisis de costra.

Momento de la limpieza	Volumen de agua	Tiempo entre colmataciones	Relación alimentación/descanso (días)	Humedad %		Materia orgánica %	
				Media	Desviación	Media	Desviación
Final etapa 60 L/m ² /d	120 m ³	24 semanas	5/2	13,8	1,5	2,7	0,7
Mediados etapa 240 L/m ² /d	498 m ³	30 semanas	7/0	5,6	2,3	5,4	2,1
Mediados y final 480 L/m ² /día	470 m ³	10 semanas		34,7	0,6	5,1	0,4
	268 m ³	4 semanas		33,2	1,2	4,5	0,2

Figura 6. Evolución de los analitos en los filtros con respecto a los caudales.



dió comprobar cómo efectivamente se enlazaban las dosificaciones, y cómo a su vez permitía al filtro airearse. El equipo utilizado fue un caudalímetro American Sigma, modelo InSight.

En la **Figura 7** se ha representado el análisis realizado en la segunda etapa (60 L/m²/d con 8 dosificaciones al día). En ella se pueden apreciar 16 picos correspondientes al periodo de análisis de dos días: se confirma cómo existe un aumento en la altura de la lámina de agua en la arqueta y una progresiva disminución de la misma.

Posteriormente, en la tercera etapa (80 L/m²/d con 16 dosificaciones al día) fueron realizados dos ensayos, arrojando ambos el mismo resultado. Con esa dosificación no se apreciaban las fases de llenado y vaciado del filtro. Por tanto, la aireación del seno del filtro no resultaría tan efi-

caz. En las **Figuras 8 y 9** se puede apreciar cómo no existe un comportamiento claro en la variación de la altura de la lámina de agua.

Con respecto a la capacidad de regeneración del filtro, los resultados en general alcanzaron las mismas cotas que los prototipos, siendo válidos para los mismos usos. Las únicas limitaciones con respecto al RD 1609/2007 son con respecto a aque-

llas que exigen una eliminación total *E. coli* (uso urbano 1.1, uso industrial 3.2 y uso ambiental 5.1), o los que exigen bajos niveles de nitrógeno (usos ambientales 5.1 y 5.2) dado que no existe desnitrificación y prácticamente todo el nitrógeno se encuentra en forma de nitrato y de fósforo (uso recreativo 4.2 para aguas estancadas) debido a que una vez los filtros se saturan de fósforo, prácticamente el que entra es el que sale.

En la cuarta etapa (120 L/m²/d con 12 dosificaciones al día) se consiguió volver a encadenar el llenado con el vaciado sin que hubiera solapamientos (**Figura 10**).

Con respecto al análisis de la varianza no hay diferencias significativas con respecto a la variación de caudal dentro de cada tipo de agua. Sin embargo, esta diferencia sí es significativa en cuanto a la diferencia entre las aguas.

Figura 7. Variación de altura de la lámina de agua con 8 dosificaciones al día.

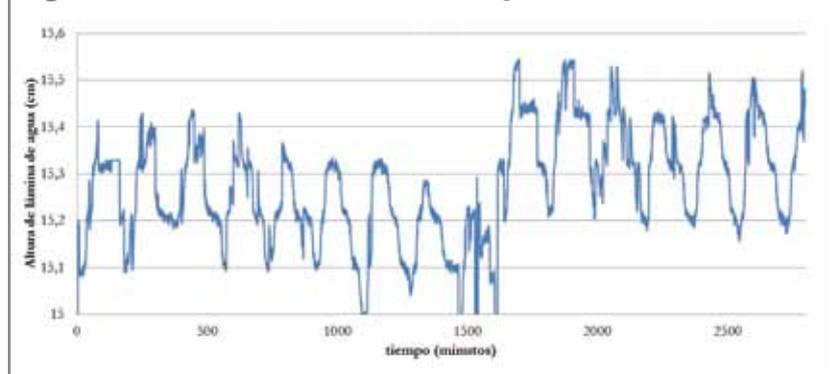




Figura 8. Variación de altura de la lámina de agua con 16 dosificaciones al día (primer ensayo).

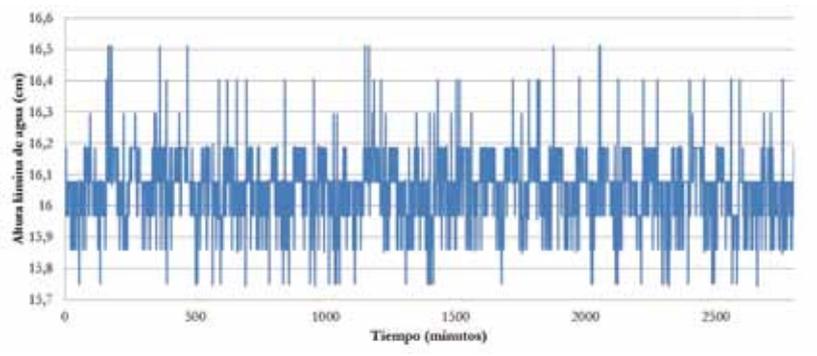


Figura 9. Variación de altura de la lámina de agua con 16 dosificaciones al día (segundo ensayo).

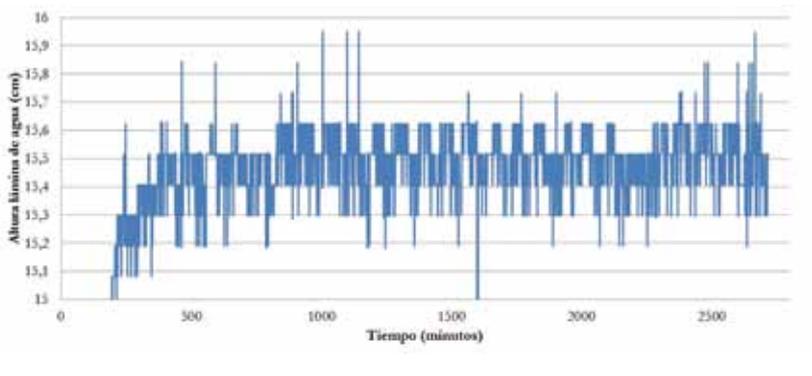
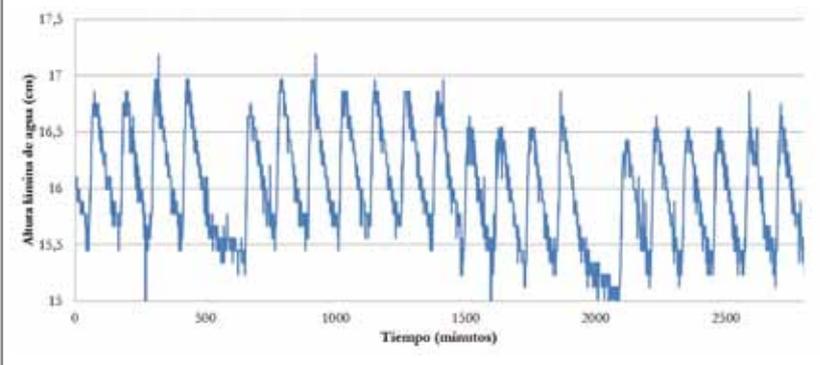


Figura 10. Variación de altura de la lámina de agua con 12 dosificaciones al día.



4. Conclusiones

El agua filtrada mediante filtros intermitentes de arena produce un agua de calidad suficiente acorde a la mayoría de usos que establece el RD 1620/2007 para su reutilización, a excepción de aquellas en las que es necesario una desinfección completa. Existe una relativa inde-

pendencia del nivel de regeneración con respecto al caudal del influente al filtro, pero hasta cierto punto, en el que los resultados empiezan a empeorar ostensiblemente.

Así para el agua procedente de lagunaje, el óptimo se encuentra en el entorno de 120-240 L/m²/d y para humedales artificiales, entre

480 y 600 L/m²/d. Para aguas cargadas la colmatación es prácticamente independiente de la carga hidráulica aplicada, dependiendo de la cantidad de agua filtrada, su carga contaminante y del régimen de alimentación y descanso, aunque de esta última en menor medida.

Para una correcta aireación del seno del filtro a escala piloto es necesario realizar 12 dosificaciones diarias.

Bibliografía

- [1] Mara, D.D.; Johnson, M.L. (2007). Waste stabilization ponds and rock filters: solutions for small communities. *Water Science and Technology*, núm. 55 (7), págs. 103-107.
- [2] Neder, K.D.; Carneiro, G.A.; Queiroz, T.R.; de Souza, M.A. (2002). Selection of natural treatment processes for algae removal from stabilisation ponds effluents in Brasilia, using multicriterion method. *Water Science and Technology*, núm. 46 (4-5), págs. 347-354
- [3] Salas, J.J. (2007). Wastewater treatment in small urban areas in Andalusia (Spain). II International Congress Wastewater Treatment in Small Communities. Seville November 2007. Abstract and keynote speeches book, págs. 168-173.
- [4] Molinos Senante, M.; Garrido Baserba, M.; Reif, R.; Poch, M. (2012). Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: environmental and economic aspects. *Science of The Total Environment*, vol. 427-428, págs. 11-18.
- [5] Darby, J.; Tchobanoglous, G.; Nor, M.A.; Maciolek, D. (1996). Shallow intermittent sand filtration: performance evaluation. *The Small Flows Journal*, núm. 2 (1), págs. 3-15.
- [6] Rodgers, M.; Mulqueen, J.; Healy, M.G. (2004). Surface clogging in an intermittent stratified sand filter. *Soil Science Society of America Journal*, núm. 68, págs. 1.827-1.832.
- [7] Rolland, L.; Molle, P.; Liénard, A.; Bouteldja, F.; Grasmick, A. (2009). Influence of the physical and mechanical characteristics of sands on the hydraulic and biological behaviors of sand filters. *Desalination*, núm. 248, (1-3), págs. 998-1.007.
- [8] Tanner, C.C.; Sukias, J.P.S.; Headley, T.R.; Yates, C.R.; Stott, R. (2012). Constructed wetlands and denitrifying bioreactors for on-site and decentralized wastewater treatment: comparison of five alternative configurations. *Ecological Engineering*, núm. 42, págs. 112-123.
- [9] Torrens, A.; Molle, P.; Boutin, C.; Salgot, M. (2009). Impact of design and operation variables on the performance of vertical-flow constructed wetlands and intermittent sand filters treating pond effluent. *Water Research*, núm. 43, págs. 1.851-1.858.
- [10] Cooper, P. (2001). Nitrification and denitrification in hybrid constructed wetlands systems. Transformations of nutrients in natural and constructed wetlands. J. Vymazal, ed., Backuys Publishers, Leiden, The Netherlands, págs., 257-270.
- [11] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20 ed., American Public Health Association.
- [12] Ortega, E.; Ferrer, Y.; Salas, J.J.; Aragón, C.; Real, A. (2010). Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones. ISBN: 978-84-491-1071-9.