

Estudio comparativo de dos sistemas de filtración casera para el tratamiento de agua para consumo humano

Comparative study of two home filtration systems for drinking-water treatment

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: OCTUBRE 14, 2014; ACEPTADO: DICIEMBRE 13, 2014

Andrea Pérez Vidal, Ph.D

andrea.perez00@usc.edu.co

Jaime Díaz Gómez, MSc

jaimediaz@uniboyaca.edu.co

GINNA PAOLA GONZÁLEZ ROJAS

gpgonzalez@uniboyaca.edu.co

Universidad de Boyacá, Colombia

Resumen

El tratamiento de agua para consumo humano a nivel de la vivienda es una opción viable para mejorar y asegurar la calidad del agua, principalmente en lugares que no cuentan con sistemas de tratamiento centralizados, los sistemas existentes operan de manera deficiente o existen condiciones de sequía. En este estudio se evaluaron dos sistemas de filtración casera, un filtro de 1 vela (1VC) y 2 velas cerámicas (2VC) durante 6 meses. Se evaluó la eficiencia de reducción de turbiedad y *E. coli* y aspectos relacionados con su operación y mantenimiento. Se empleó un sustrato sintético cuyo valor promedio de turbiedad fue de 32.7 ± 2.81 UNT y 3.9×10^5 UFC/100ml de *E. coli*. Los resultados mostraron que ambos sistemas de filtración lograron reducir la turbiedad a valores promedio de 0.28 UNT (99% de eficiencia) y eliminar *E. coli* entre 99.999 y 100%. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en términos de la calidad de agua filtrada por ambos sistemas, sin embargo, fueron evidentes diferencias desde el punto de vista económico, operativo y de mantenimiento.

Palabras Clave

Agua potable; calidad de agua; enfermedades transmitidas por el agua; filtro de vela cerámica; tratamiento casero de agua.

Abstract

The water treatment at the household level is a viable option to guarantee safe drinking water, mainly in places where there is not a centralized water treatment system, the existing operates deficiently, or the region suffers prolonged drought periods. In this study, two household filtrations systems were evaluated during 6 months: a ceramic one candle filter (1VC) and a ceramic two candles filter (2VC). The performance of the two filters was evaluated in terms of turbidity and *E. coli* removal as well as considering economical, operating and maintenance aspects. The raw water quality was simulated using a synthetic substrate with averages turbidity and *E. coli* values of 32.7 ± 2.8 NTU and 3.9×10^5 CFU/100 ml respectively. The effluent of both filters had average turbidity values of 0.28 NTU (99 % efficiency). The observed average removal of *E. coli* in both systems was between 99.999 and 100 %. No statistical differences in terms of filtered water quality were observed between the systems. However, there were evident differences in economical, operative and maintenance aspects.

Keywords

Drinking-water; water quality; waterborne diseases; ceramic filter; household water treatment.

Los autores agradecen a OXFAM International, Acción Contra el Hambre [ACF] y Colciencias, por el apoyo financiero recibido para la ejecución del proyecto.

I. INTRODUCCIÓN

A pesar de los avances tecnológicos de los últimos años y de los esfuerzos políticos, en la mayoría de países en desarrollo, los problemas de calidad del agua continúan siendo una amenaza para la salud pública. Más de 1.200 millones de personas no tienen acceso a una fuente de agua segura y las enfermedades relacionadas con la falta o la inadecuada calidad del agua afectan a más de 2.300 millones de personas (Rojas, 2006). Anualmente 1.4 millones de niños mueren por enfermedades diarreicas, de las cuales el 88% se atribuye al consumo de agua no segura o a deficientes condiciones de higiene y saneamiento (Prüss-Üstün, Bos, Gore & Bartram, 2008).

En Colombia, la enfermedad diarreica aguda ocupa el segundo lugar de morbi-mortalidad en la población menor de cinco años, especialmente en los municipios con mayor porcentaje de necesidades básicas insatisfechas y mala calidad de agua para consumo humano (MinSalud & INS, 2011). De acuerdo con el documento CONPES 3550 (DNP, 2008), que establece los lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental, anualmente en Colombia se presentan 2.300 muertes por diarrea causada por deficiencias en el acceso a agua y a problemas relacionados con saneamiento e higiene.

Son evidentes las inequidades regionales y sociales en el país que hacen que las prioridades entre regiones sean distintas y que las preferencias en materia de calidad ambiental evolucionen a ritmos diferentes (DNP & SNU, 2005). Mientras la cobertura de acueducto en las zonas urbanas del país alcanza el 97%, en las zonas rurales solo llega al 53.3% (Procuraduría General de la Nación, Minambiente, Superservicios, & Unicef, 2008); mientras el Índice de Riesgo por Calidad de Agua [IRCA] en la zona rural es, en promedio, de 48.8% –riesgo alto–, en la zona urbana es de 13,2% –riesgo bajo– (INS, 2013).

Se destaca que el incumplimiento de la reglamentación se concentra principalmente en los parámetros de calidad del agua: *E. coli*, coliformes totales, cloro residual, turbiedad y color, lo cual es un indicador claro de riesgo microbiológico (WHO, 2011). En general, el 27.4 % de la población colombiana ha estado expuesta al consumo de agua no segura por deficiencias en su tratamiento o por acceso a fuentes de abastecimiento contaminadas (INS, 2013).

Las tecnologías de tratamiento del agua a nivel de la vivienda o en el punto de consumo se han convertido en

una opción viable para mejorar y asegurar la calidad del agua, principalmente en aquellos lugares que no cuentan con un sistema de tratamiento centralizado –o este opera de manera deficiente– o en sitios localizados en zonas con condiciones de sequía.

Existen varias tecnologías para el tratamiento del agua a nivel domiciliario que han sido usadas principalmente en los países en desarrollo por su facilidad de acceso, la simplicidad de su operación, el grado de aceptación por parte de la comunidad y su eficacia en la reducción del riesgo microbiológico (Mwabi et al, 2011). Entre las tecnologías más empleadas para el mejoramiento de la calidad microbiológica del agua para consumo humano se encuentran (Sobsey, 2002; OPS, 2005):

- ebullición del agua;
- desinfección solar;
- radiación ultravioleta [UV];
- desinfección solar combinada con radiación UV;
- cloración y almacenamiento apropiado; y
- sistemas combinados de coagulación-filtración y cloración

Para tecnologías como la cloración, la desinfección solar y la radiación UV, continúa siendo un desafío el tratamiento de aguas con elevada turbiedad (Sobsey, 2002), por lo que se requiere complementar estos sistemas con otros pre-tratamientos basados en sedimentación o filtración de partículas –presedimentador, filtros de membrana, filtros de tela, filtros con medio granular, filtros lentos en arena, filtros cerámicos– (Sobsey, 2002; OPS, 2005).

La selección de una tecnología para una comunidad depende de múltiples factores, tales como la calidad del agua cruda, la disponibilidad y el requerimiento de materiales y equipos, el tiempo de uso, el número de usuarios, las preferencias de la población, el nivel educativo y la disponibilidad de personal para entrenamiento y monitoreo que asegure la implementación exitosa de la tecnología (Mwabi et al, 2011).

En Colombia, algunos sistemas o unidades de filtración caseros han sido promovidos por instituciones como la Organización Panamericana de la Salud [OPS] para el tratamiento y almacenamiento seguro de agua, por su eficiencia, bajo costo y facilidad de manejo. Estas opciones han significado una solución inmediata, tanto para situaciones de emergencia o desastre, como para la

provisión de agua a comunidades rurales alejadas y dispersas que, previsiblemente, no podrán disponer, en un futuro mediano, de sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua (López & Schiffer, 2012).

Se destaca que los proveedores de estos equipos y tecnologías ofrecen alto rendimiento y calidad excepcional del agua; sin embargo, dentro del contexto nacional, pocas de estas tecnologías son aceptadas, asimiladas y aprovechadas al máximo por la población, en razón de factores internos y externos que van desde las propias concepciones socioculturales, hasta las relacionadas con el mercado local y nacional para la adquisición de los consumibles y las piezas de recambio que se necesitan para sostener su uso y mantener sus beneficios.

Aunque la efectividad y viabilidad del uso de algunos sistemas de filtración han sido evaluadas a nivel internacional (Gerba & Naranjo, 2000; Gerba, Naranjo & Jones, 2008; Mwabi et al, 2011; Mahmood, Baig, Nawab, Shafqat, Pervez, & Zeb, 2011; Loo, Fane, Krantz & Lim, 2012), el periodo de evaluación no ha sido prolongado, sino que se ha limitado, por lo general, al número de días establecido por la *United States Environmental Protection Agency* [USEPA] (1987) en su protocolo para evaluación microbiológica de filtros. A nivel nacional, los datos técnicos y científicos que dan cuenta de la efectividad de sistemas de filtración como los filtros de olla cerámica

(Vidal, 2010; Lerman, 2012), de velas cerámicas (Clasen, García, Boisson & Collin, 2005) y de membrana (Naranjo & Gerba, 2008; Walters, 2008), están fragmentados.

Con este estudio se evaluó la eficiencia en la reducción de turbiedad y *E. coli* de dos sistemas de filtración casera, conformados por velas cerámicas impregnadas con plata coloidal, bajo condiciones controladas de laboratorio y durante un periodo prolongado de operación (150 días).

El desarrollo de este estudio se enmarcó en un proyecto de investigación más amplio –financiado por Acción Contra el Hambre- España (Misión Colombia), Oxfam International, Colciencias (convocatoria de semilleros de investigación, 2013) y la Universidad de Boyacá–, que busca generar conocimiento en torno a la selección de un sistema de filtración efectivo y sostenible que tenga aceptación social en el contexto colombiano.

II. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en las instalaciones de la Universidad de Boyacá ubicadas en la ciudad de Tunja con una temperatura ambiental promedio de 13°C. Los sistemas de filtración evaluados contaron con su respectivo duplicado. Las características de los sistemas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los sistemas de filtración

Sistema	Descripción	Esquema
Filtro de una vela cerámica (1VC)	- Material filtrante: una bujía o vela cerámica revestida en su interior con plata coloidal y carbón activado, marca Stéfani® - Tipo de flujo: por gravedad - Volumen de almacenamiento: 15.6 litros	
Filtro de dos velas cerámicas (2VC)	Material filtrante: dos bujías o velas cerámicas revestidas en su interior con plata coloidal y carbón activado, marca Stéfani® Tipo de flujo: por gravedad Volumen de almacenamiento: 15.4 litros	

Para el diseño experimental del estudio se definieron, como variables de respuesta: turbiedad y *E. coli*; y como variables de control: pH, Sólidos Disueltos Totales [SDT], conductividad y color. La metodología del estudio se dividió en tres fases:

- Ajuste de sustrato sintético.
- Seguimiento y operación de los sistemas de filtración.
- Selección del sistema de filtración más eficiente.

A. Ajuste de sustrato sintético

El volumen diario de filtración fue de 7.5 litros/ filtro, valor que es equivalente al requerimiento mínimo de agua para el consumo humano y la preparación de alimentos, teniendo en cuenta las necesidades de las mujeres lactantes (Howard & Bartram, 2003); por lo tanto, el volumen total

de sustrato sintético que se preparó fue de 30 litros diarios.

Como base del sustrato se empleó agua ultrapura, obtenida con un equipo de purificación marca Cascada™ Pall Corporation, y se ajustaron las variables fisicoquímicas y microbiológicas mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables fisicoquímicas y microbiológicas ajustadas en el sustrato sintético

Variable	Valor	Mecanismo de ajuste	Referencia
Turbiedad	30 UNT [*]	Adición de Caolín en una concentración de 0.24g/L ^{**}	EPA (1987); Tassinari, Doherty y Marison (2013); Muthuraman y Sasikala, (2014); González et al. (2006)
SDT	1500 mg/L [*]	Adición de Cloruro de Sodio grado comercial en una concentración de 1.57g/L ^{**}	EPA (1987)
<i>E. coli</i>	1x10 ⁵ UFC/100ml	Preparación semanal de solución concentrada de <i>E. coli</i> a partir de la Réplica de la cepa ATCC 95922 liofilizada marca Microbiologics® con el método de siembra por aislamiento y cultivo en caja de Petri con agar selectivo para Coliformes	Mwabi et al. (2011)

Notas.

* La EPA (1987) recomienda, como condición crítica para evaluar los filtros de vela cerámica, un valor de turbiedad de 30UNT y SDT de 1500 mg/L.

** La concentración fue determinada a partir de ensayos preliminares en un litro de agua, usando treinta minutos de agitación de la mezcla.

El ajuste de la variable de *E. coli* en el sustrato sintético se realizó en dos etapas: estandarización de la concentración de *E. coli* y preparación del inóculo.

Estandarización de la concentración de *E. coli*

La bacteria fue recuperada de acuerdo con la ficha técnica del producto y posteriormente sembrada por aislamiento en agar endo e incubada a 37°C, con el fin de confirmar sus características macroscópicas, microscópicas y bioquímicas.

Las colonias típicas de *E. coli* presentes en el agar endo fueron sembradas en agar nutritivo marca OXOID CM0003 durante 24 horas a 37°C.

La biomasa de la bacteria fue resuspendida con NaCl al 0,85% y ajustada su absorbancia en valores de 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 y 1.5 a una longitud de onda de 500 nm.

Se realizaron diluciones seriadas de los tubos con las diferentes absorbancias obtenidas con el crecimiento de *E. coli* y se determinó el número de unidades formadoras de colonias (UFC/mL) por recuento en placa en agar nutritivo.

Con este procedimiento se logró construir una curva de calibración entre UFC/mL vs Absorbancia (R² 0.9681) con el objetivo de utilizar la Absorbancia (Densidad Óptica) como medida indirecta de la concentración de UFC/mL (Madigan, Martinko & Parker, 2009) y facilitar el proceso inoculación en el sustrato sintético.

Preparación del inóculo

Se tomó una colonia de la bacteria *E. coli* sembrada en agar nutritivo, obtenida en la etapa anterior y se inoculó en un tubo falcón aforado (25 mL) con caldo *Brain Heart Infusion* (BHI) marca OXOID 02-599, el cual se dejó incubar por alrededor de doce horas a una temperatura de 37°C y una velocidad de agitación de 180 r.p.m (cultivo over-night). Pasado el tiempo de incubación, se ajustó la absorbancia del cultivo a 0.1 y una longitud de onda de 500 nm, lo cual correspondió, según la curva de calibración, a 62 x 10⁶ UFC/mL.

Para la inoculación diaria de los 30 litros de sustrato sintético, se estableció como dosis una alícuota de 0.46 ml del cultivo over-night de *E. coli* en caldo BHI con absorbancia de 0.1, lo que permitió obtener una concentración final de *E. coli* alrededor de 1x10⁵ UFC/100ml en el sustrato, previa filtración, tal como lo describen Mwabi et al., (2011). El cultivo over-night de *E. coli* se almacenaba a 4°C y era renovado una vez por semana, ya que ensayos preliminares indicaron que la bacteria pierde su viabilidad después de ese tiempo.

B. Seguimiento y operación de los sistemas de filtración

El seguimiento del desempeño de los sistemas de filtración se realizó mediante el control y la medición de las variables detalladas en la Tabla 3, durante un periodo de seis meses.

Tabla 3. Variables de seguimiento de la operación de los sistemas de filtración

Variable	Unidades	F*	A/E*	Método**
Tasa de filtración	L/hora	Semanal	E	Volumétrico
Turbiedad	UNT	Diaria	A/E	Nefelométrico – 2130B
<i>E. coli</i> **	NMP/100mL	Semanal	A/E	Filtración por membrana SM9222B
pH	Unidades	Semanal	A/E	Electrométrico – 4500-H+B
SDT	mg/L	Semanal	A/E	Diferencia de sólidos totales (2540B) y sólidos suspendidos totales (2540D).
Conductividad	µS/cm	Semanal	A/E	Laboratorio – 2510B
Color aparente	UPC	Semanal	A/E	Espectrofotó-metría – 2120F

Notas.

* A: afluente; E:efluente; F: frecuencia de medición

** APHA, AWWA, & WEF (2012).

*** Variable microbiológica reglamentada en la Resolución 2115 de 2007.

C. Selección del sistema de filtración más eficiente

Mediante el análisis integral de los resultados del estudio, en términos de variables técnicas, operacionales y de mantenimiento, se identificó el sistema más adecuado, apoyado en herramientas de la estadística descriptiva y un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas con base en un modelo completamente al azar. Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software de libre acceso «R-Project».

III. RESULTADOS

A. Ajuste del sustrato sintético

La Tabla 4 describe la variación de las características

físicoquímicas y microbiológicas del sustrato sintético obtenido durante el estudio.

Aunque algunos autores recomiendan tiempos de agitación de 24 horas para garantizar la completa hidratación y disolución de las partículas de caolín (González et al., 2006; Tassinari et al., 2013; Muthuraman & Sasikala, 2014), en el estudio solo se emplearon 30 minutos debido al elevado volumen diario de sustrato a preparar; sin embargo, se destaca que la baja variabilidad de la turbiedad y de los sólidos disueltos (SDT) que se obtuvo, lo que evidencia el adecuado ajuste diario del sustrato.

Tabla 4. Variación de las características físicoquímicas y microbiológicas en el sustrato sintético a lo largo del periodo de operación de los sistemas de filtración

Variable	Unidades	Promedio	DS	Min.	Máx.	CV
pH	-	7.33*	± 0.61	5.44	9.91	0.09
Conductividad	µs/cm	2454.2	± 61.24	2428	2794	0.02
Turbiedad	UNT	32,33	± 2.81	25.6	40.4	0.09
SDT	mg/L	1627.3	± 112	1400	1800	0.07
Color	UPC	257.5	± 62.9	138	435	0.25
<i>E. coli</i>	UFC/ml	3.9x10 ⁵	2.1x10 ⁵	1.2x10 ⁵	8.2x10 ⁵	-

*Media geométrica

SDT: Sólidos Disueltos Totales DS: Desviación Standard

CV: Coeficiente de variación

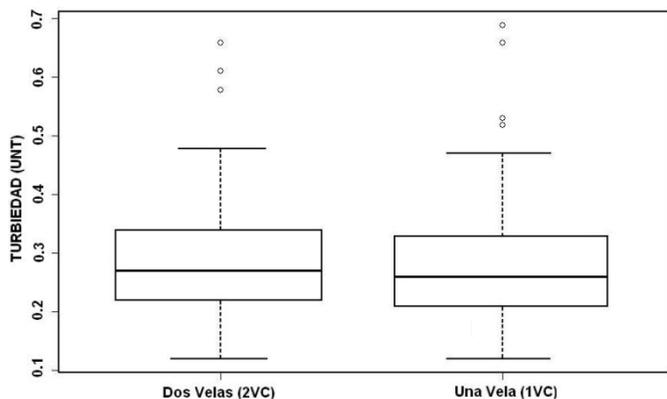
B. Seguimiento y operación de los sistemas de filtración

Los duplicados de ambos sistemas de filtración presentaron una alta correlación lineal, positiva en términos de la variable turbiedad, con valores del coeficiente de Pearson de 0.71 y 0.72 para los filtros de dos velas y una vela cerámica, respectivamente; por lo tanto, los resultados del estudio pudieron ser promediados para su análisis. La Figura 1 muestra, mediante un diagrama de

cajas y alambres, la variación de los datos de turbiedad del efluente de ambos sistemas de filtración.

Asimismo, se logró reducir la turbiedad del sustrato sintético a valores inferiores de 2.0 UNT durante todo el tiempo de operación en ambos sistemas de filtración, dando cumplimiento al valor máximo de turbiedad reglamentado por la Resolución 2115 de 2007 para agua potable.

Figura 1. Variación de la turbiedad efluente de los sistemas de filtración



La eficiencia de los dos sistemas garantiza, durante todo el tiempo, el cumplimiento de la norma internacional (USEPA, 2009) que establece valores de turbiedad < 1.0 UNT. Se destaca que los datos atípicos fueron inferiores a 0.7 UNT y nunca superaron los valores reglamentarios.

La distribución de los datos de turbiedad en los diagramas de cajas muestra un comportamiento muy similar entre ambos sistemas, con valores de la mediana de 0.22 UNT para el 2VC y 0.21 UNT para 1VC, similares a los encontrados por Franz (2005), quien evaluó filtros de velas cerámicas marca Stefani® partiendo de un sustrato natural con valores de turbiedad entre 15 – 31 UNT y concentraciones de *E. coli* entre 24.000 a 1.200.000 UFC/100mL; se destaca que, aun cuando los valores de turbiedad del efluente fueron similares en ambos estudios, las eficiencias de reducción de turbiedad fueron mayores en esta investigación (99.1%) en comparación con las alcanzadas por dicho autor (93.1%).

El análisis de varianza ANOVA arrojó que no hay diferencia significativa entre ambos sistemas evaluados, en términos de la variable de turbiedad ($gl=1$, $F=0.150$, $p=0.705$). Sin embargo, desde el punto de vista económico, operativo y de mantenimiento, si se evidencian diferencias que podrían influir significativamente en el grado de sostenibilidad y en la aceptación de la tecnología en las comunidades rurales (Mwabi et al., 2011).

La turbiedad es una variable de fácil interpretación y de rápida y económica medición (Burlingame, Pickel, & Roman, 1998), además de estar reglamentada (Resolución 2115 de 2007 de los Ministerios de Protección Social; y Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) y ser un indicador para evaluar la eficacia de la remoción de quistes de protozoos en el proceso de filtración de las plantas de

potabilización. Se recomiendan valores bajos de turbiedad en el agua filtrada (< 0.3 UNT) para reducir el riesgo microbiológico por presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* y favorecer la eliminación de bacterias y virus en un posterior proceso de desinfección (Heller et al., 2004; Betancourt & Rose, 2004; USEPA, 2009). Durante el estudio se observó que los sistemas de filtración casera alcanzaron valores de turbiedad menores a 0.3 UNT, durante más de la mitad del tiempo, logrando valores promedio de turbiedad en efluente de 0.28 ± 0.11 y 0.28 ± 0.12 UNT para los filtros de 2VC y 1VC, respectivamente, lo que evidencia el adecuado funcionamiento de los sistemas, en términos de reducción de turbiedad.

Con relación al riesgo microbiológico, en el estudio de Franz (2005) se reportan eficiencias de eliminación *E. coli* del orden de 99.967%, valores inferiores a los alcanzados en esta investigación, en la cual se observó que los dos sistemas de filtración lograron eficiencias de eliminación de entre 99.999 y 100% (entre cinco y tres unidades logarítmicas), probablemente por la eficacia, como bactericida, de la plata coloidal impregnada en las velas cerámicas (Bielefeldt, Kowalski & Summers, 2009; van der Laan et al., 2014). Se destaca que más del 95% de las muestras analizadas de *E. coli* indicaron ausencia de la bacteria, cumpliendo con lo exigido por USEPA (2009) para coliformes totales y con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) para pequeños sistemas de tratamiento comunitario o a nivel casero en países en vía de desarrollo.

De acuerdo con los resultados del estudio de Vidal (2010), la presencia de plata coloidal, además de favorecer la eliminación de bacterias, impide el crecimiento de hongos en el medio filtrante, lo que mantiene la calidad y apariencia física del filtro.

En el estudio de Mwabi et al (2011), quienes evaluaron sistemas de filtración de olla y vela cerámicas usando un sustrato sintético promedio de 89.2 UNT y 1×10^5 UFC/ml de *E. coli*, se lograron menores eficiencias que las obtenidas en esta investigación, alcanzando remociones de turbiedad entre 94 y 95 % (turbiedad efluente filtrado de 5.3 – 4.5 UNT) y eficiencias de remoción de *E. coli* de tres unidades logarítmicas en ambos filtros (99 y 98% respectivamente). Probablemente existe una correlación entre el mayor nivel de turbiedad del sustrato sintético y los menores porcentajes de remoción de turbiedad y *E. coli* alcanzados por dicho autor.

Adicionalmente, Bielefeldt et al., (2009) indican que aun cuando la plata coloidal garantiza la reducción de contaminación microbiológica en los filtros de olla cerámica (entre tres y cuatro unidades logarítmicas), la eficiencia se reduce en una unidad logarítmica a medida que se incrementa el volumen de agua filtrada. Por lo anterior, sería recomendable evaluar valores de turbiedad superiores, con el fin de determinar el límite máximo hasta el cual se garantizarían elevadas eficiencias, además de la vida útil en términos de volumen de agua filtrada. De forma complementaria, a medida que se incrementan los valores de turbiedad en el efluente filtrado, pueden presentarse problemas como el crecimiento de microorganismos, particularmente durante el almacenamiento del agua tratada, que conllevarían al deterioro de la calidad del agua (Mwabi et al., 2011). La Tabla 5 detalla el análisis estadístico descriptivo de los resultados obtenidos con las variables de control, las cuales fueron medidas a lo largo del estudio para ambos sistemas de filtración.

Tabla 5. Análisis estadístico de las características del efluente filtrado en los cuatro sistemas de filtración

Variable		Filtro de dos velas cerámicas	Filtro de una vela cerámica
pH n = 120	Promedio	9.1	8.5
	DS	±0.70	±0.84
	Mínimo	8.3	7.7
	Máximo	9.8	9.4
	C.V	0.06	0.10
SDT n= 24	Promedio	1598	1534
	DS	±180.1	±135.2
	Mínimo	1417	1399
	Máximo	1778	1669
	C.V	0.03	0.03
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) n = 120	Promedio	2353.5	2325.2
	DS	±143,54	±148,73
	Mínimo	2209,9	2176,4
	Máximo	2497,1	2473,9
	C.V	0.04	0.05
Color aparente (UPC) n = 120	Promedio	5,3	5,8
	DS	±2,7	±2,4
	Mínimo	0	0
	Máximo	8,16	8,05
	C.V	0,18	0,19

Nota. n: número de datos; DS: desviación estándar; CV: coeficiente de variación

Se observa que el pH varió en un rango apropiado, distante de valores ácidos que pudieran fomentar la lixiviación hacia la fase líquida de la plata presente en la vela cerámica. En el estudio realizado por Vidal (2010) con

filtros de olla cerámica impregnadas de plata coloidal, no se encontraron concentraciones –trazas– de este metal que superaran el límite permisible establecido por la normatividad colombiana (0.1 mg/L), destacándose que los valores de pH del agua afluyente oscilaron en un rango muy cercano a la neutralidad (entre 7.0 y 8.0 unidades). Sin embargo, sería recomendable evaluar los sistemas de filtración con valores de pH inferiores hasta niveles de 5.0 como lo recomienda el manual de la EPA (1987) con el objetivo de descartar cualquier posibilidad de riesgo químico.

El comportamiento de variables como los SDT y la conductividad indican que ninguno de los sistemas de filtración es eficiente para la remoción de material disuelto, debido a que el tamaño de las partículas es inferior al tamaño del poro de las velas cerámicas Stefani® (0.5 – 1.0 μm). Con relación al color aparente, durante todo el estudio este fue inferior al límite máximo establecido por la reglamentación colombiana ($\leq 15\text{UPC}$).

C. Selección del sistema de filtración más eficiente

Aunque el análisis estadístico de los resultados indica que no existen diferencias significativas en términos de la eficiencia de reducción de turbiedad y *E. coli* para ambos sistemas de filtración, como se indicó, hay aspectos operativos, de mantenimiento y económicos que pueden influir en la determinación del sistema más apropiado para una comunidad.

Con relación a los aspectos operativos se observó que la tasa de filtración de ambos sistemas depende fuertemente de la carga hidráulica sobre la vela (altura de lámina de agua) y la presencia de material suspendido en el afluyente, el cual va quedando adherido en las paredes de la vela, obstruyendo sus poros, un comportamiento que también fue evidente en el estudio de Franz (2005). Adicionalmente, se encontró que, a medida que transcurre el tiempo de funcionamiento de los sistemas y a pesar de realizar diariamente las actividades de limpieza de las velas, las tasas de filtración disminuyen 0.42 L/hora (Día 30 de operación) a 0.15 L/hora (Día 120 de operación) para el filtro de 1VC, y de 0.83 a 0.19 L/hora, para el filtro de 2VC.

Se resalta que la existencia de dos velas incrementa la tasa de filtración en alrededor de un 40 a 50%, lo que brinda mayor producción de agua filtrada y comodidad al usuario, principalmente porque permitiría filtrar un mayor

volumen de agua diaria, garantizando, al menos, el volumen mínimo de 7.5 litros recomendado por persona (Howard & Bartram, 2004), condición que cumplió a satisfacción el filtro de una vela cerámica solo durante los dos primeros meses de funcionamiento.

Otro factor a considerar en la selección del sistema, es la vida útil de las velas cerámicas, la cual, en teoría, está entre seis meses o 20.000 litros filtrados (Clasen & Boisson, 2005; CAWST, 2010), periodo a partir del cual, el usuario tendría que reponerlas, costo –aproximadamente de US\$7.0/vela– que se duplicaría para el filtro de dos velas. Adicionalmente en Colombia, la facilidad de adquisición de las velas es limitada, principalmente en las zonas rurales, aspecto que deberá ser mejorado en caso de implementarse de forma masiva esta forma de tratamiento de agua a nivel rural.

Respecto del mantenimiento de los sistemas, es recomendable que las velas permanezcan húmedas para evitar que la cerámica se fraccione o genere poros que puedan afectar su eficacia. La limpieza diaria, frotando suavemente la vela con la mano, evita la acumulación de sólidos suspendidos que puede provocar malos olores y reducir la tasa de filtración. Durante el estudio se observó que la limpieza periódica, con un cepillo de cerdas suaves, no incrementaba de forma notoria la tasa de filtración, pero sí podía exponer la vela a un deterioro mayor, si el cepillado no fuese suficientemente suave.

Otro aspecto relevante es la vulnerabilidad que se presenta al momento de instalar o reponer la vela, ya que puede romperse el dispositivo plástico inferior al ajustar muy fuerte la tuerca plástica.

A manera de síntesis, el sistema de filtración con dos velas mejora la tasa de filtración proporcionando mayor cantidad de agua filtrada en un menor tiempo, comparado con el de una vela cerámica; sin embargo, los costos de reposición se duplicarían y se incrementaría la vulnerabilidad de daño de la vela durante la instalación. Sin embargo, se considera que el sistema de dos velas sería el más adecuado para comunidades que cuenten con facilidades, tanto de acceso, como para la compra de las velas.

IV. CONCLUSIONES

Para afluentes con valores promedio de turbiedad de 32.7 ± 2.81 UNT y 3.9×10^5 UFC/100ml de *E. coli*, ambos

sistemas de filtración lograron elevadas eficiencias de remoción (99% de turbiedad y 99.999 - 100% de *E. coli*) y cumplieron las normas nacionales de calidad de agua para consumo humano, lo que evidencia el potencial y los beneficios de este tipo de sistemas caseros para el aseguramiento de la calidad del agua y la reducción del riesgo microbiológico.

No se encontraron diferencias significativas entre ambos sistemas, en términos de la calidad del efluente filtrado, mostrando que, independiente del número de velas cerámicas, se alcanzan eficiencias similares, por lo que las diferencias se concentraron en aspectos económicos, operativos y de mantenimiento.

El sistema de filtración con dos velas cerámicas alcanza una mayor tasa de filtración, comparada con el filtro de una vela, lo que beneficia al usuario; sin embargo, el costo de reposición de las velas y los riesgos asociados al mantenimiento de los sistemas se duplican (disponibilidad y facilidad de compra; potencial daño de la vela durante la instalación, etc.).

V. REFERENCIAS

- American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], & World Economic Forum [WEF]. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [22a ed.]. Washington DC: APHA.
- Betancourt, W.Q. & Rose, J. (2004). Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia. *Journal Veterinary Parasitology*, (126)1-2, 219-234.
- Bielefeldt, A.R., Kowalski, K., & Summers, R.S. (2009). Bacterial Treatment Effectiveness of Point-Of-Use Ceramic Water Filters. *Water Research*, (43)14, 3559-3565.
- Burlingame, G.A., Pickel, M.J., & Roman, J.T. (1998). Practical applications of turbidity monitoring. *Journal of American Water Works Association*, 90(8), 57-69.
- Center for Affordable Water and Sanitation Technology [CAWST]. (2010). *Hojas Informativas para el tratamiento de agua a nivel domiciliar y su almacenamiento seguro: Filtro de Vela de Cerámica* [en línea]. Recuperado de <http://resources.cawst.org/es/asset/hoja-informativa-filtro-de-cer%3A1mica-tipo-vela-detallada>
- Clasen, T., & Boisson, S. (2006). *Filtros de cerámica para el hogar para el tratamiento de agua para beber en respuesta a desastres: evaluación de un programa piloto en república dominicana, práctica y tecnología del agua*. Londres, UK: IWA.
- Clasen, T., García, G., Boisson, S., & Collin, S. (2005). Household-based ceramic water filters for the prevention of diarrhea: a randomized, controlled trial of a pilot program in Colombia. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, (73)4, 790-795.

- Departamento Nacional de Planeación [DNP], & Sistema de Las Naciones Unidas en Colombia [SNU]. (2005). *Hacia una Colombia equitativa e incluyente. Informe de Colombia Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Bogotá, Colombia: DNP/SNU. Disponible en <http://www.acnur.org/biblioteca/pdf/5621.pdf?view=1>
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2008). *Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química* [Documento Conpes 3550]. Bogotá, Colombia: DNP
- Environmental Protection Agency [EPA]. (1987). *Guide standard and protocol for testing microbiological water purifiers*. Washington, DC: EPA.
- Franz, A. (2005). *Estudio del rendimiento de los filtros de vela de cerámica en Kenia, incluyendo pruebas para la remoción de coliformos* [tesis de maestría]. Instituto de Tecnología de Massachusetts: Cambridge, MA. Disponible en <http://web.mit.edu/watsan/Docs/Student%20Theses/Kenya/AmberFranz-Thesis%205-18-05.pdf>
- Gerba, C. P., & Naranjo, J. E. (2000). Microbiological water purification without the use of chemical disinfection. *Wilderness & environmental medicine*, 11(1), 12-16.
- Gerba, C., Naranjo, J., & Jones, E. (2008). Virus Removal from Water by a Portable Water Treatment Device. *Wilderness and Environmental Medicine*, 19(1), 45-49.
- González, G., Chávez, M., Mejías, D., Mas, M., Fernández, N., & León de Pinto, G. (2006). Uso del exudado gomoso producido por *Samanea saman* en la potabilización de las aguas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia*, (29)1, 14-22.
- Heller, L., Bastos, R.K.X., Vieira, M.B.C.M., Bevilacqua, P.D., Alves, L.L.B., Santana, M.M.M., Oliveira, A.A., Machado, P.M., Salvador, D.P., & Cardoso, A.B. (2004). Oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*: circulação no ambiente e riscos à saúde humana. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, (13)2, 79-92.
- Howard, G., Bartram, J. (2003). *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. *World Health Organization* [WHO/SDE/WSH/03.02]. Ginebra, Suiza: WHO. Disponible en http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/wsh0302/en/
- Lerman, D.A. (2012). *Filtros cerámicos una alternativa de agua segura*. [tesis de maestría]. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Loo, S. L., Fane, A. G., Krantz, W. B., & Lim, T. T. (2012). Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. *Water Research*, 46(10), 3125-3151.
- López, L., & Schiffer, A. (2012). *Manual de requerimientos mínimos para intervenciones en agua, saneamiento e higiene en emergencias*. Madrid, España. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., & Parker, J. (2009). *Brock Biología de los microorganismos* [8a ed.]. Madrid, España: Prentice Hall.
- Mahmood, Q., Baig, S. A., Nawab, B., Shafiq, M. N., Pervez, A., & Zeb, B. S. (2011). Development of low cost household drinking water treatment system for the earthquake affected communities in Northern Pakistan. *Desalination*, 273(2), 316-320.
- Ministerio de Salud [MinSalud], & Instituto Nacional de Salud [INS]. (2011). *Protocolo de vigilancia en salud pública mortalidad por enfermedad diarreica aguda*. Recuperado de <http://www.ins.gov.co/lineas-de-accion/Subdireccion-Vigilancia/sivigila/Protocolos%20SIVIGILA/PRO%20EDA.pdf>
- Instituto Nacional de Salud [INS]. (2013). *Estado de la vigilancia de la calidad de agua para consumo humano en Colombia. Subsistema de Información para la Vigilancia del Agua para Consumo Humano SIVICAP*. Bogotá, Colombia: INS. Disponible en <http://www.ins.gov.co/sivicap/Normatividad/Informe%20Vigilancia%20Calidad%20Agua%20a%C3%B1o%202012.pdf>
- Muthuraman, G., & Sasikala, S. (2014). Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (20)25, 1727-1731.
- Mwabi, J.K., Adeyemo, F.E., Mahlangu, T.O., Mamba, B.B., Brouckaert, B.M., Swartz, C.D., Offringa, G. Mpenyana-Monyatsi, L., & Momba, M.N.B. (2011). Household water treatment systems: A solution to the production of safe drinking water by the low-income communities of Southern Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* (36) 1120-1128.
- Naranjo, J., & Gerba, C.P. (2008). *LifeStraw® Family Filter Testing. Efficacy evaluation*. [reporte]. Recuperado de: http://www.iwanagreen.com/pdf/Prueba_tecnica_LSF_Arizona.pdf
- Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. Lima, Perú: OPS.
- Procuraduría General de la Nación, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [Minambiente], Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Superservicios], Departamento Nacional de Planeación [DNP], Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF]. (2008). *Panorama nacional: los niños, el agua y el ambiente sano*. En *La infancia, el agua y el saneamiento básico en los planes de desarrollo departamentales y municipales* (Cap. 2; pp.17-29). [en línea]. Recuperado de <http://www.unicef.org.co/pdf/Agua2.pdf>
- Prüss-Ustün, Boss, R., Gore, F., Bartram, J. (2008). *Safer water, better health Costs, benefits and sustainability of interventions to protect and promote health*. Ginebra, Suiza: WHO.
- Resolución 2115 de 2007 (Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007, julio 4). *Diario Oficial No. 46679*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional.
- Rojas, R. (2006). *Planes de seguridad del agua. Hojas de Divulgación Técnica, 100*. [en línea]. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsair/e/hdt/hdt100/hdt100.pdf>
- Sobsey, M. (2002). *Managing Water in the Home: Accelerated Health Gains from Improved Water Supply*. Ginebra, Suiza: WHO. Disponible en http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/WSH02.07.pdf
- Tassinari, B., Doherty, S., & Marison, I. W. (2013). Submicron capsules extracted from rapeseed as novel flocculant agents for the treatment of turbid water. *Water research*, 47(14), 4957-4965.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA]. (2009). *National primary drinking water regulations*. EPA 816-F-09-004. Recuperado de <http://www.epa.gov/ogwdw/consumer/pdf/mcl.pdf>

- Van Der Laan, H., Van Halem, D., Smeets, P.W.M.H, Soppe, A.I.A, Kroesbergen, J., Wubbels F, G., Nederstigt, J., Gensburger, I., Heijman, S.G.J. (2014). Bacteria and virus removal effectiveness of ceramic pot filters with different silver applications in a long term experiment. *Water Research (51)* 47-54.
- Vidal, S.M. (2010). Evaluación de la efectividad del filtro a base de arcilla y plata coloidal en la potabilización de agua, medida por pruebas fisicoquímicas y microbiológicas. Facultad de Tecnología [tesis]. Universidad Tecnológica de Pereira: Colombia.
- Walters, A. (2008). *A performance evaluation of the lifestraw: a personal point of use water purifier for the developing world* [tesis]. University of North Carolina at Chapel Hill.
- World Health Organization [WHO]. (2011). Guidelines for Drinking Water Quality [4a ed.]. Ginebra, Suiza: WHO. Disponible en http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf

CURRÍCULOS

Andrea Pérez Vidal, PH.D. Ingeniera Sanitaria; Máster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental; y Doctora en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la Universidad del Valle (Cali, Colombia). Fue miembro de Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental de la Universidad del Valle. Actualmente es docente de tiempo completo e investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santiago de Cali.

Jaime Díaz Gómez, M.Sc. Ingeniero Sanitario de la Universidad del Valle (Cali, Colombia); Especialista en Digestión Anaerobia de Aguas Residuales de la Universidad Agrícola de Wageningen (Holanda); Máster en Ciencias en el Área de Ciencias Ambientales y Tecnología (IHE - Holanda). Docente e investigador de la Universidad de Boyacá, en las áreas de procesos ambientales, modelación, gestión del recurso hídrico, gestión ambiental y tratamiento de aguas residuales.

Ginna Paola González Rojas. Estudiante del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Boyacá, vinculada al semillero de investigación Clima, del grupo de investigación Gestión de Recursos Hídricos.