

# Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración

## Safe water for rural communities from an alternative filtration system

Camilo A. Torres-Parra, César A. García-Ubaque, Juan C. García-Ubaque, María C. García-Vaca y Robinson Pacheco-García

Recibido 4 marzo 2016 / Enviado para modificación 27 noviembre 2016 / Aceptado 12 mayo 2017

### RESUMEN

**Objetivo** Proponer un prototipo de sistema de tratamiento de agua para zonas rurales colombianas.

**Materiales y Métodos** El prototipo consta de cuatro compartimientos en los cuales se adelantan procesos de clarificación del agua con piedra de alumbre y filtración, utilizando materiales granulares como: arenas de distinta granulometría, piedra pómez, carbón activado y gravilla. El agua problema se emuló siguiendo las características del agua encontrada en la zona rural del país y su monitoreo se realizó siguiendo la normatividad vigente en Colombia.

**Resultados** Hubo reducción en coliformes fecales y totales del 99,9 %, turbiedad del 98 % y color del 83 %. En todos los casos los registros obtenidos permiten catalogar el agua tratada como apta para el consumo humano. El pH presentó un ligero aumento debido a la presencia de piedra pómez y otras calizas en el material filtrante, pero el valor medido, está dentro del límite máximo aceptado para agua potable.

**Conclusiones** El sistema de tratamiento (purificación) evaluado en el presente estudio, produjo un agua apta para consumo humano a partir de agua con características promedio de zonas rurales semi-templadas del país. La tecnología propuesta es de fácil adaptación y difusión, y permite el control de enfermedades de origen hídrico en zonas desprovistas de sistemas de acueducto.

**Palabras Clave:** Agua potable, purificación del agua, desarrollo rural (*fuentes: DeCS, BIREME*).

### ABSTRACT

**Objective** Propose a prototype system for safe water treatment in Colombian rural areas.

**Materials and Methods** The prototype consists of four chambers working on a water clarification process using alum stone, also working on a filtration processes using granular materials such as different grain sizes of sand, pumice stone, activated carbon and gravel. The water problem was emulated based on the average water features found in the countryside and its monitoring mechanism tracked the current regulations in Colombia.

**Results** There was a reduction of the fecal and total coliform of the 99.9 %, a reduction of the 98 % of turbidity, and of an 83 % of color. In all the cases, the records obtained enable to catalog the treated water as fit for human consumption. The pH, presented a slight increment due to the presence of pumice and other limestone in the filter material, but the measured value was included under the upper limit accepted for potable water.

**Conclusions** The treatment (purification) system evaluated in this study produced suitable water for human consumption obtained from countryside average water. The proposed technology is easy for adoption and diffusion and contributes to prevent waterborne diseases in areas without water systems.

**Key Words:** Drinking water, water purification, rural development (*source: MeSH, NLM*).

CT: Ing. Ambiental y Sanitario. M. Sc. Educación. Docente Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia. [ctorres@ucatolica.edu.co](mailto:ctorres@ucatolica.edu.co)  
CG: Ing. Civil. Ph. D. Ingeniería. Profesor Asociado Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. [cagarciau@udistrital.edu.co](mailto:cagarciau@udistrital.edu.co)  
JG: MD. Ph. D. Salud Pública. Profesor Titular. Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. [jgarciau@unal.edu.co](mailto:jgarciau@unal.edu.co)  
MG: Ing. Química. M. Sc. Ingeniería Química. Docente, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia. [megarcia@ucatolica.edu.co](mailto:megarcia@ucatolica.edu.co)  
RP: Ing. Industrial. M. Sc Gerencia Ambiental. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. [rpachecog@udistrital.edu.co](mailto:rpachecog@udistrital.edu.co)

En la zona rural colombiana, la cobertura del servicio de acueducto es del 53 % y de alcantarillado de un 16 %, generando riesgos a la salud pública y retraso frente al cumplimiento del objetivo No. 7 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, que propone una cobertura del 78,2 % y del 72,4 % respectivamente, para el año 2015 (1). Aunque el acceso a estos servicios ha mejorado en los últimos tiempos, sigue presentándose inequidad entre las zonas urbanas y rurales, debido principalmente a las condiciones de prestación de estos servicios (2-5).

El anterior escenario preocupa tanto al sector gubernamental, como a la población rural y por ende, debe preocuparle al sector académico. Esto se debe a que la carencia de agua de calidad impacta negativamente los grupos vulnerables que componen los asentamientos humanos, ubicados en sitios donde la capacidad institucional no ha podido brindar una solución centralizada para abastecer con agua segura a estas zonas. Se requieren soluciones urgentes, eficaces y de fácil adopción para combatir las enfermedades ocasionadas por agua que no cumple con estándares mínimos y por consiguiente, generan brotes de enfermedades endémicas como cólera y diarrea en los consumidores finales. Algunas tecnologías disponibles se basan en filtración mediante bio-arena, adición de nanopartículas de plata y uso de membranas, entre otros (6-8).

Este trabajo se centró en la construcción y monitoreo en laboratorio de un prototipo desarmable y descentralizado de tratamiento de agua para zonas rurales denominado Torre de Tratamiento, que permite mediante clarificación y filtración, utilizando materiales granulares como: arenas, piedra pómez, carbón activado y gravilla, una opción viable de agua segura para zonas rurales que se abastecen de agua proveniente de nacimientos, aljibes o ríos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño del sistema Torre de Tratamiento

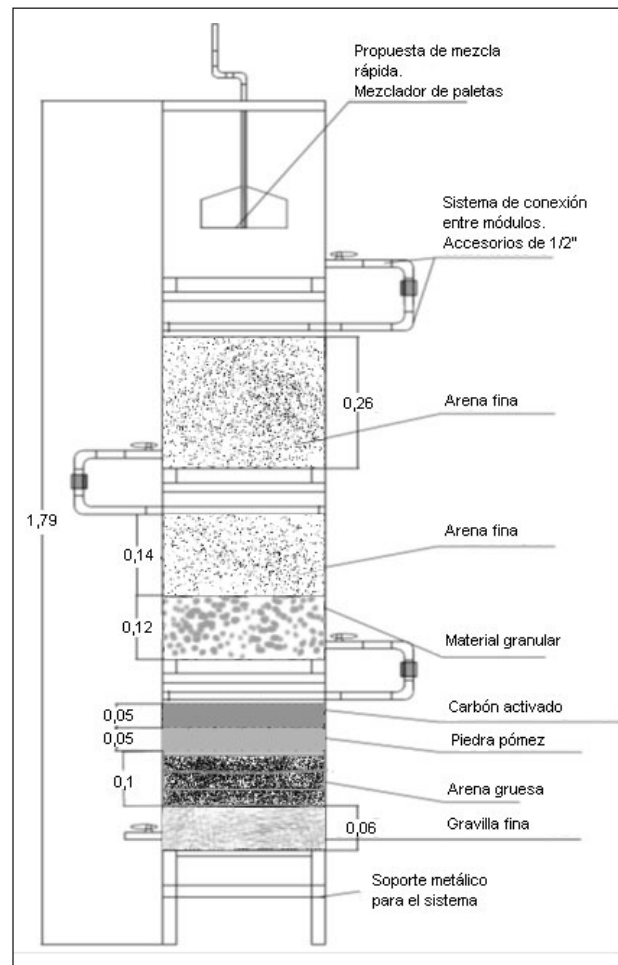
De acuerdo con las propuestas descentralizadas de sistemas de mejoramiento de calidad de agua para consumo humano planteadas por la Organización Panamericana de la Salud (9), el diseño de la Torre de Tratamiento se realizó teniendo en cuenta los diseños de filtro lento de arena, filtro CARPOM y proceso de microfiltración. Esto se hizo con el fin de combinar sus capacidades y mejorar un agua promedio encontrada en la zona rural colombiana, que se caracteriza por presentar altos contenidos de material orgánico y contaminación microbiológica.

### Ajuste experimental

El modelo de torre se propone en la Figura 1. Se utilizaron materiales de fácil consecución para las comunidades

en zona rural. El sistema se construyó en laboratorio apoyado de cuatro tanques de 5 galones de capacidad, interconectados con accesorios hidráulicos en PVC de 1/2", con una altura total de 179 cm, 35 cm de diámetro, un mezclador de entrada y un grifo de salida. Toda la estructura se sostuvo con una base metálica que brindó mayor estabilidad al prototipo. Su operación se llevó a cabo en los laboratorios de calidad de agua de la Universidad Piloto de Colombia ubicada en Bogotá. Se manejó una temperatura entre 12 °C y 15 °C al aire libre, que corresponde al promedio registrado en zona rural de Cundinamarca, Colombia, donde la problemática de calidad del agua afecta a más del 70 % de la población (10).

Figura 1. Esquema del sistema Torre de Tratamiento



### Preparación del sistema

El sistema se construyó en laboratorio teniendo en cuenta las siguientes especificaciones:

El primer tanque en orden descendente. Se dispuso para llevar a cabo procesos de clarificación del agua apoyados por piedra de alumbre y teniendo en cuenta una mezcla rápida y posterior sedimentación de los flocs for-

mados por el proceso de coagulación-floculación (9). En esta parte se colocó un mezclador metálico manual con aspas en forma trapezoidal para ayudar a completar la mezcla rápida del agua con el alumbre.

En el segundo tanque, se dispuso un lecho conformado en su totalidad por una cama de arena fina, con tamaño efectivo entre 0,30-0,45 mm, un coeficiente de uniformidad  $\leq 2$  y una altura de 26 cm. En el tercer tanque, se dispuso un lecho de arena fina con las mismas características del segundo tanque y una altura de 14 cm, seguido por un lecho de grava gruesa de tamaño mediano (7 a 8 cm de diámetro) y una altura de 12 cm (11). Los anteriores estratos granulares se separaron por material geotextil resistente al agua para evitar la mezcla entre ellos.

Por último, en el cuarto tanque, se dispuso un lecho de carbón activado en forma granular con 5 cm de altura, seguido por una capa de piedra pómez cortada en forma no uniforme con una altura de 5 cm teniendo como base el filtro CARPOM (9). Luego se colocó una capa de arena gruesa de 10 cm de alto con un tamaño efectivo entre 0,9-1,1 mm y un coeficiente de uniformidad de  $\leq 3$ . Por último, se ubicó un lecho de gravilla fina de 6 cm de alto con un tamaño entre 2,5 a 3 cm de diámetro (11). Al igual que en el tanque tres, cada lecho se separó con material geotextil resistente al agua.

Es importante resaltar que los medios filtrantes, como las arenas finas y gruesas, se tamizaron y posteriormente se lavaron con abundante agua para eliminar la presencia de algún material orgánico, arcillas u otro contenido contaminante. El sistema se recirculó con abundante agua durante dos semanas para eliminar cualquier rezago de suciedad y color presente en los materiales utilizados. Luego, para disminuir el riesgo de contaminación al interior del sistema, se aplicó hipoclorito de sodio al 6 % (12).

Para el caso de filtros de lecho simple, la experiencia ha permitido establecer espesores recomendados para diferentes casos: filtración de agua decantada, filtración directa o filtración descendente o ascendente. Por lo cual, la altura total del lecho filtrante es de 0,52 m, distribuidos en 0,40 m de arena fina que representa el 77 % de la altura total y 0,12 m de material granular, que representa el 23 % de la altura total del lecho filtrante (13).

#### **Preparación del agua contaminada en laboratorio**

Para llevar a cabo el experimento, se preparó un agua problema en laboratorio teniendo en cuenta parámetros de calidad propios de un agua promedio encontrada en zona rural de Cundinamarca. Para esto, se añadió material orgánico como hojas secas, humus y materia fecal de origen animal a 20 L de agua, proveniente del acueducto de la ciudad de Bogotá. El agua preparada presentó 60 unidades

nefelométricas de turbidez (UTN), 9 UFC/100 ml de coliformes fecales, 30 UFC/100 ml de coliformes totales y 6,9 de pH. Una receta similar se preparó diariamente y se vertió al sistema, pasando previamente por un proceso de coagulación-floculación. Se utilizaron 20 L de agua 2 veces al día.

#### **Análisis de calidad de agua**

La evaluación de calidad de agua a la entrada y salida del sistema, registró parámetros microbiológicos de coliformes fecales y totales, turbiedad, pH y color. El agua problema se circuló en el sistema, teniendo en cuenta la importancia del periodo de maduración mínimo de cuatro semanas de la capa biológica, en el estrato de arena fina de un filtro lento de arena (14). Los efluentes tratados, así como el agua problema, se examinaron en las semanas 4, 5, 9 y 12 de funcionamiento continuo del sistema.

El trabajo se apoyó metodológicamente por un estudio descriptivo, en donde se midieron y recolectaron datos acerca del comportamiento del prototipo con relación a su eficiencia y teniendo en cuenta un muestreo no probabilístico. En este estudio, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las causas relacionadas con las características de la investigación y del interés del investigador (15). Por esta razón y apoyados en la teoría de la filtración lenta de arena, se escogió el periodo para realizar los análisis de laboratorio.

La recolección y la preservación de las muestras de agua se realizaron según lo establecido por el Instituto Nacional de Salud (16), y las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo con los métodos estándar propuestos por el Cepis (17). Las muestras se analizaron en el laboratorio de calidad de agua de la Universidad Piloto de Colombia mediante diferentes ensayos como: filtración por membrana para la determinación de coliformes totales y fecales, un turbidímetro Orbeco, un pH-metro digital Hanna, un multiparámetro procesado Hach, un conductímetro de mesa Mettler Toledo y elementos de vidrio y reactivos propios para la titulación de los ensayos fisicoquímicos (14).

## **RESULTADOS**

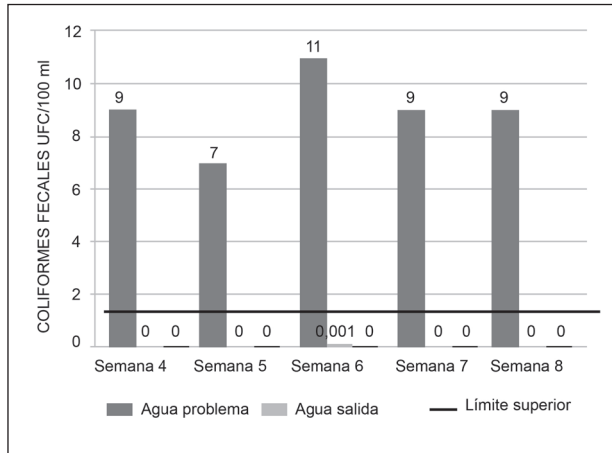
Los experimentos desarrollados en el laboratorio para comprobar la eficiencia del sistema de filtración, se llevaron a cabo durante septiembre y diciembre de 2014.

#### **Reducción de coliformes fecales**

Como se evidencia en la Figura 2, el sistema tuvo un comportamiento positivo con relación a la remoción de este indicador (18), ya que obtuvo un promedio de eliminación del 99,9 % durante el tiempo de monitoreo. Esta eficiencia se mantuvo constante en el sistema, el cual re-

dujo un promedio de 9 UFC/100 ml presentes en el agua problema a presentar 0 UFC/100 ml en el caudal de salida durante los cuatro muestreos propuestos.

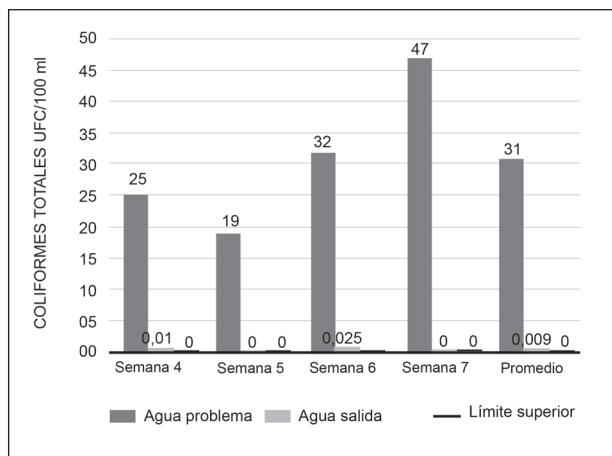
**Figura 2.** Resultados obtenidos para coliformes fecales



**Reducción de coliformes totales**

De acuerdo con la Figura 3, el sistema obtuvo una disminución de este indicador de contaminación (que agrupa la mayoría de las especies de los géneros citrobacter, enterobacter, websiella, y escherichia coli) (18), en un 99,9 % en el caudal de salida. La eficiencia de remoción se pudo comprobar en la descontaminación del agua problema, donde se presentaban en promedio 31 UFC/100 ml, y luego del tratamiento propuesto, el dato promedio fue de 0 UFC/100 ml en el agua de salida.

**Figura 3.** Resultados obtenidos para Coliformes Totales

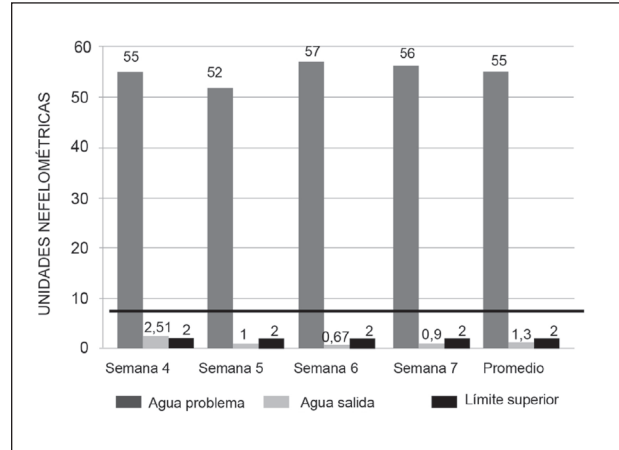


**Reducción de turbiedad**

La Figura 4 muestra que el sistema disminuyó este indicador de contaminación, que es importante en la calidad del agua segura y la eficiencia de los procesos de coagulación y filtración al remover patógenos, especialmente aquellos que se agregan en las partículas por procesos de adsorción

(19). Durante la fase de monitoreo, el agua de salida mejoró en un 98 % el parámetro de turbiedad; pasando de un promedio de 55 UTN en el agua problema, a un promedio de 1,3 UTN en el agua tratada. Lo cual registró también una alta remoción de color por parte de la torre de tratamiento.

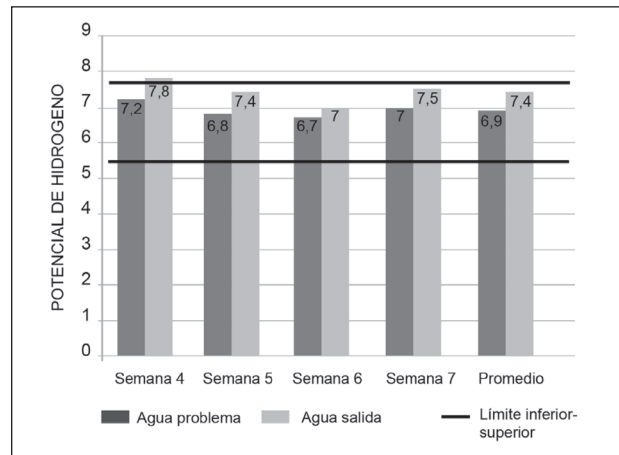
**Figura 4.** Resultados obtenidos para Turbiedad



**Valores de pH**

En la Figura 5 se observa un ligero aumento de este indicador con relación al agua problema. Posiblemente debido al material filtrante, ya que se utilizó piedra pómez y otras calizas. Los datos reportados tanto en el agua de entrada como en la de salida fueron de 6,9 y 7,4 unidades de pH en promedio, respectivamente.

**Figura 5.** Resultados obtenidos para pH



**Caudal de salida**

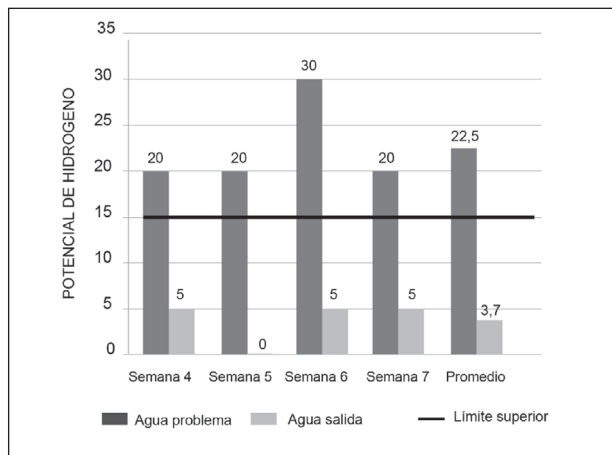
Con relación al caudal de salida, el sistema aportó un promedio de 1,5 l/min, manteniendo este valor constante durante la fase de monitoreo. Esta situación evidencia que los materiales granulares utilizados no sufrieron compactación, lo cual hubiera podido causar una colmatación del sistema, afectando negativamente su eficiencia. Lo

anterior puede atribuirse al pretratamiento de clarificación propuesto, el cual no solo eliminó la turbiedad, sino también la concentración de material orgánico y microorganismos presentes, mejorando la calidad de agua a la entrada del sistema (20).

### Impacto en otros parámetros físico-químicos

La Figura 6 muestra que el color del agua filtrada obtuvo un índice de remoción del 83 %, ya que de un color aparente en el agua problema de 22,5 UPC (unidades platino cobalto) se presentó un promedio de 3,75 UPC en el agua tratada. Después se realizó un proceso de centrifugación de la muestra de agua tratada por 10 minutos, donde se obtuvo el color verdadero (14), en el cual no se observó ningún cambio durante la fase de monitoreo. Las aguas tratadas deben poseer valores de 3 a 15 UPC y turbiedades por debajo de 2 UTN (13).

Figura 6. Resultados obtenidos para Color



## DISCUSIÓN

### Diseño propuesto de la Torre de Tratamiento

El diseño del sistema se apoyó en la filtración lenta de arena, debido a que este es el material predominante dentro del filtro. Por lo anterior, se utilizó como base de diseño una tasa de filtración de 0,21 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h (13). Así mismo, para establecer las alturas de las capas granulares, se partió de la relación entre el espesor de la capa de arena y la de antracita en un filtro de dos medios, en donde el espesor de la capa de antracita representa el 60 % - 80 % y la arena el 20 % - 40 % del espesor total del medio filtrante (21).

Se utilizaron materiales como carbón activado y piedra pómez debido a su alto porcentaje de adsorción, ideales para remover olores indeseados y capturar impurezas presentes en el agua. Al utilizar diversos materiales de filtración, se mejora la eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en aguas con una alta carga orgánica,

debido a sus características de carga superficial y de adsorción. La disponibilidad de consecución de estos materiales a nivel local y su facilidad de construcción, facilita que este sistema de tratamiento sea transferido a zonas rurales utilizando herramientas sencillas (12).

### Reducción Microbiológica

La eliminación de coliformes totales y fecales en el sistema demostró la maduración del lecho y la capacidad de adsorción de los medios granulares utilizados. Los microorganismos contenidos en el agua problema utilizan como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica y pueden multiplicarse en forma selectiva, lo que contribuye a la formación de una película biológica (14). Así mismo, los patógenos de mayor tamaño son retenidos por los pequeños poros que se forman en las arenas finas y pueden causar la reducción de caudales hidráulicos en el sistema. Es importante resaltar que a partir de 0,50 m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula, produciendo así reacciones bioquímicas que convierten los productos de degradación microbiológica en amoníaco y a los nitritos en nitratos (6).

El contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y se relaciona directamente con la capacidad que tienen dichos organismos para encontrar el sustrato y disminuir su tasa de mortalidad, durante la cual se libera materia orgánica que es utilizada por bacterias de las capas más profundas y así consecutivamente, lo que podría ser otra de las razones para evidenciar la mortalidad microbiológica debido a la menor oferta de alimento para satisfacer sus necesidades nutricionales (13).

### Reducción de turbiedad

En promedio, la turbiedad a la salida fue baja (1,3 UTN) debido a la reducción de algunas partículas muy finas de arena, por el proceso de lavado y los procesos de adsorción llevados a cabo por los distintos estratos granulares, lo cual permitió reducir la materia orgánica y las características organolépticas del agua problema. Es importante resaltar que la adsorción consiste en la acumulación de una sustancia entre dos fases líquido/sólido; la sustancia a remover se denomina adsorbato y aquella sobre la cual tiene lugar la adsorción es el adsorbente (22). Así mismo la Unión Europea en el año 1998 estableció 1 como valor admisible de turbiedad basado en criterios de salud y sugiere que la mediana de la turbiedad del agua tratada sea idealmente menor de 0,1 UTN para una desinfección efectiva (23).

Para la eliminación de la turbiedad el proceso de adsorción es muy importante, ya que se lleva a cabo bajo fuerzas fisicoquímicas y moleculares que causan un puente entre las partículas y que afectan la carga de la par-

tícula bajo la influencia de fuerzas cinéticas, las cuales son responsables de la unión entre los granos de arena y las partículas disueltas en el agua (6). Dentro del sistema de tratamiento existen diversos materiales granulares que cumplen con la función de adsorber contaminantes, como el caso del carbón activado, material que ha demostrado ser capaz de adsorber sustancias productoras de olor y sabor como metabolitos de la producción algas y fenoles, con riesgo para la salud humana por tener efectos tóxicos y mutagénicos como metales pesados y plaguicidas (22).

Así mismo, el sistema posee un compartimento en donde se llevan a cabo procesos convencionales de coagulación- floculación, procesos que garantizan la remoción de partículas en suspensión y turbiedad, además de mejorar la remoción de materia orgánica natural y de compuestos fenólicos. La combinación de los procesos de adsorción y coagulación se denomina coagulación mejorada, con la cual se obtienen eficiencias de reducción de compuestos fenólicos hasta del 100 %, color entre el 81 % – 89 % y absorbancia UV254 del 99 %. Durante el tiempo de monitoreo, se evidenció que los materiales presentaron compresión en los diferentes estratos del sistema, lo que dio como resultado la desaceleración de la velocidad de filtración por la adhesión de las partículas contaminantes a los medios granulares, pero en general la eficiencia del sistema con relación a este parámetro continuó constante durante el monitoreo (23).

### Las variaciones de otros parámetros durante el tiempo de funcionamiento

El aumento de pH después del proceso de descontaminación del agua problema, se pudo relacionar directamente con la presencia de iones monovalentes contenidos en las partículas de arena, que al reaccionar con el agua, causaron un aumento de este indicador luego de la recirculación diaria, la cual mantuvo el lecho filtrante húmedo y como consecuencia se presentó la disolución de las sustancias monovalentes (6). Adicionalmente, como el sistema contiene carbón activado, las interacciones electrostáticas entre los iones contenidos en el caudal de entrada y la superficie del carbón, tienden a modificar el pH del agua de salida (24).

Durante el estudio se evidenció una notoria disminución del color, lo cual se puede atribuir al uso del sulfato de aluminio en soluto como coagulante. Este producto es reconocido en el mercado local como piedra de alumbre y se caracteriza por su alta eficiencia, fácil consecución y bajo costo, aunque produce grandes cantidades de sedimento durante el proceso. Con 0,75 gr de producto se pueden clarificar 20 litros de agua hasta obtener una medida del parámetro de color que cumple lo establecido en la legislación vigente (7).

El sistema propuesto puede considerarse como una solución viable para tratar la problemática de agua para consumo humano que poseen las comunidades rurales en zonas semitempladas del país, ya que en sí representa una tecnología de fácil consecución, transmisión, operación y replicación en contextos sociales que requieren de soluciones rápidas para tratar sus problemas de salud pública y acceso a un agua segura, previniendo así enfermedades como: diarrea, gastroenteritis, cólera, fiebre tifoidea, afecciones de la piel e irritaciones oculares, consecuencia directa de la presencia de bacterias patógenas, virus entéricos, protozoarios y helmintos parásitos en aguas para consumo.

La capacidad de adsorción y características de carga de los materiales granulares utilizados influyó como un determinante para mejorar la calidad del agua en la salida del sistema, permitiendo mejorar la eficiencia en la remoción de una alta carga orgánica.

Disponer de una altura >0,5 metros en la disposición de los materiales granulares en el sistema y la cantidad limitada de sustrato al entrar en contacto con la capa microbiológica en formación, se convirtieron en factores definitivos para inhibir el crecimiento bacteriológico y aumentar la mortalidad microbiológica, produciendo un agua segura para consumo libre de patógenos que comprometan la salud de las personas.

Los procesos de clarificación (coagulación-floculación) garantizan la remoción de partículas en suspensión y turbiedad. Además de mejorar la remoción de materia orgánica natural y de compuestos fenólicos, favorece las dinámicas de adsorción y coagulación, denominadas así mismo, coagulación mejorada, con las cuales se obtuvo una remoción de color de un 83 % y de turbiedad de un 98 % en el agua a la salida de la tecnología propuesta \*

## REFERENCIAS

1. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. Objetivos de desarrollo del milenio Colombia 2014. Bogotá D.C.: Linca Publicidad Ltda / Nuevas Ediciones S.A.; 2014.
2. Fuller J, Goldstick J, Bartram J, Eisenberg J, Tracking progress towards global drinking water and sanitation targets: A within and among country analysis. *Sci Total Environ*. 2016;514:587-64.
3. Istenic D, Bodik I, Bulc T, Status of decentralized wastewater treatment systems and barriers for implementation of nature-based systems in central and eastern Europe. *Environ Sci Pollut R*. 2015;22 (17):12879-84.
4. Massoud M, Al-Abady A, Jurdi M, Nuwayhid I, The challenges of sustainable access to safe drinking water in rural areas of developing countries: Case of zawtar el-charkieh, Southern Lebanon. *J Environ Health*. 2010;72 (10):24-30.
5. García-Ubaque C, Vaca-Bohórquez M, García-Ubaque J. Factibilidad técnica y de salud pública de la recolección de aguas nieblas: Estudio de caso. *Rev. salud pública*. (Bogotá). 15 (3): 366-373, 2013.
6. Baig S, Mahmood Q, Nawab B, Shafqat M, Pervez A, Improvement of drinking water quality by using plant biomass through

- household biosand filter. A decentralized approach. *Ecol Eng.* 2011;37(11):1842-8.
7. Abebe L, Smith J, Narkiewicz S, Oyanedel-Craver V, Conaway M, Sing A, et al. Ceramic water filters impregnated with silver nanoparticles as a point-of-use-treatment intervention for HIV-positive individuals in Limpopo Province, South Africa: A pilot study of technological performance and human health benefits. *J Water Health.* 2014;12(2):288-300.
  8. Arnal J, García-Fayos B, Sancho M, Verdú G, Lora J. Design and installation of decentralized drinking water system based on ultrafiltration in Mozambique. *Desalination* 2010;250(2):613-17.
  9. Organización Panamericana de la Salud. *Tecnologías para Abastecimiento de Agua en Poblaciones Dispersas.* Lima: Organización Mundial de la Salud. 2005.
  10. Defensoría del Pueblo. *Diagnóstico de la calidad del agua para consumo humano Año 2010: Análisis de las políticas públicas desde la perspectiva de los derechos humanos.* Bogotá D.C.: Defensoría del Pueblo; 2011. Disponible en: <https://goo.gl/rKStn8>.
  11. Huisman L, Wood W. *Slow Sand Filtration.* Geneva: World Health Organization; 1974. Disponible en: <https://goo.gl/M6Nemk>.
  12. Torres C, Villanueva S. *El filtro de arena lento: manual para el armado, instalación y monitoreo.* Bogotá D.C.: Universidad Piloto de Colombia; 2014. Disponible en: <https://goo.gl/Qspi8s>.
  13. Cánepa L, Barrenechea A, Aurazo M, Maldonado V. *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual I: Teoría Tomo I,* Lima: Editorial Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS); 2004.
  14. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* 16a. Ed. Washington: American Water Works Association; 1991.
  15. Hernández R, Fernández C, Baptista P. *Metodología de la investigación.* 4a Ed. México: McGraw Hill Interamericana; 2006.
  16. Instituto Nacional de Salud. *Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio.* Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Salud; 2011. Disponible en: <https://goo.gl/UQFZCo>.
  17. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. *Control de calidad del agua: Métodos de análisis para la evaluación de la calidad del agua.* Lima: Organización Mundial de la Salud; 1996.
  18. American Water Works Association. *Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de suministros de agua comunitaria.* 5a Ed. Madrid: McGraw - Hill Profesional; 2002.
  19. Sawyer C, McCarty P, Parkin G. *Química para Ingeniería Ambiental.* 4a Ed. Bogotá D.C.: McGraw-Hill; 2001.
  20. Rodríguez C. *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Agua.* Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas; 1995.
  21. Cánepa L, Pérez J. *Manual I, II y III: Teoría y Evaluación, Diseño, Operación, Mantenimiento y Control.* Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; 1992.
  22. Torres P, Cruz C, González M, Gutiérrez H, Barba L, Escobar J, et al. Reducción de pentaclorofenol en el agua cruda del río Cauca mediante adsorción con carbón activado en procesos de potabilización. *Revista Ingeniería e Investigación.* 2008;28(3):92-5.
  23. Montoya C, Loaiza D, Torres P, Cruz C, Escobar J. Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA.* 2011;16:137-48.
  24. Rodríguez P, Giraldo L, Moreno J. Influencia del pH sobre la adsorción en carbón activado de Cd(II) y Ni(II) desde soluciones acuosas. *Rev Colomb Quim.* 2010;39(3):401-12.