

## EVALUATION OF A SLOW SAND FILTER TO IMPROVE WATER QUALITY IN A RURAL EDUCATIONAL INSTITUTION IN AGUAS BLANCAS, VALLEDUPAR-CESAR

## EVALUACIÓN DE UN FILTRO LENTO DE ARENA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA EN INSTITUCIÓN EDUCATIVA RURAL EN AGUAS BLANCAS, VALLEDUPAR- CESAR

Ballesteros Galvis, L. A.<sup>1</sup>; Atencio Serna, A. S.<sup>2</sup>; Carrillo Mendoza, C.  
A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>**MSc. Luz Anaís Ballesteros Galvis.** Docente tiempo completo. Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Semillero de Investigación en Ingeniería y Microbiología de Agua Residual y Potable IMARP. Universidad Popular del Cesar. e-mail: [luzballesteros@unicesar.edu.co](mailto:luzballesteros@unicesar.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5070-3474>

<sup>2</sup>**Ing (c). Andrea Sofía Atencio Serna.** Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Facultad de Ingeniería y tecnológicas. Semillero de Investigación en Ingeniería y Microbiología de Agua Residual y Potable IMARP. Universidad Popular del Cesar. e-mail: [asatencio@unicesar.edu.co](mailto:asatencio@unicesar.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0593-9546>

<sup>3</sup>**Ing (c). Carlos Andrés Carrillo Mendoza.** Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Facultad de Ingeniería y tecnológicas. Semillero de Investigación en Ingeniería y Microbiología de Agua Residual y Potable IMARP. Universidad Popular del Cesar. e-mail: [carlosacarrillo@unicesar.edu.co](mailto:carlosacarrillo@unicesar.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9474-3621>

### Entidad

Universidad Popular del Cesar. Vía a Patillal, Valledupar, Cesar, Colombia.

Tel: +57-605-5885592, Ext. 1004.

E-mail: [carlosacarrillo@unicesar.edu.co](mailto:carlosacarrillo@unicesar.edu.co)

Recibido: 20/12/2025 / Aceptado: 26/04/2026

## Resumen

La investigación evaluó la eficiencia de un filtro lento de arena (FLA) como alternativa de tratamiento para mejorar la calidad del agua suministrada en una institución educativa rural en el corregimiento de Aguas Blancas, departamento del Cesar. El estudio se desarrolló en tres fases: diagnóstico, diseño e implementación del sistema, y evaluación de su desempeño. En la fase diagnóstica se caracterizó el agua proveniente del pozo que abastecía la institución, analizando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos según los lineamientos del Decreto 1575 de 2007. Los resultados iniciales mostraron valores elevados de turbidez, color aparente y presencia de coliformes totales y *E. coli*, clasificando el agua en un nivel de riesgo alto de acuerdo con el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA). Se evaluó la calidad del agua tratada tras el paso por el sistema. El FLA mostró una remoción significativa de turbidez, color aparente y microorganismos indicadores, logrando la eliminación casi total de coliformes totales y *E. coli*. Los parámetros químicos conservativos, como la dureza, alcalinidad y nitratos, presentaron reducciones moderadas, propias del funcionamiento de esta tecnología. Los resultados confirmaron la viabilidad técnica y económica del filtro lento de arena como una alternativa sostenible para mejorar la calidad del agua en comunidades rurales.

**Palabras clave:** Calidad del agua, filtración, comunidades rurales, sostenibilidad, microbiología.

## Abstract

This research evaluated the efficiency of a slow sand filter (SSF) as a treatment alternative to improve the quality of water supplied to a rural educational institution located in the village of Aguas Blancas, Cesar Department, Colombia. The study was conducted in three phases: diagnosis, system design and implementation, and performance evaluation. During the diagnostic phase, the groundwater source supplying the institution was characterized through the analysis of physicochemical and microbiological parameters, following the guidelines established in Decree 1575 of 2007. The initial results showed high turbidity and apparent color values, as well as the presence of total coliforms and *Escherichia coli*, classifying the water as high risk according to the Water Quality Risk Index (IRCA). The quality of the treated water after passing through the system was subsequently evaluated. The SSF demonstrated significant removal of turbidity, apparent color, and indicator microorganisms, achieving near-complete elimination of total coliforms and *E. coli*. Conservative chemical parameters, such as hardness, alkalinity, and nitrates, exhibited moderate reductions, consistent with the expected performance of this technology. Overall, the results confirmed the technical and economic feasibility of the slow sand filter as a sustainable alternative for improving water quality in rural communities.

**Keywords:** Water quality, filtration, rural communities, sustainability, microbiology.

## 1. INTRODUCCIÓN

El acceso a agua segura es un derecho humano, reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU, 2010); sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos del siglo XXI, millones de personas en el planeta aún no cuentan con este recurso básico.

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, alrededor de 2.000 millones de personas carecen de agua segura y 3.600 millones no disponen de un sistema de saneamiento adecuado, lo cual representa un grave desafío global en materia de salud pública y sostenibilidad ambiental (UNESCO, 2023).

Esta problemática afecta especialmente a las zonas rurales de los países en desarrollo, donde la escasa infraestructura y los limitados recursos económicos dificultan la instalación de sistemas eficientes de tratamiento y distribución de agua. En Colombia, la desigualdad del acceso al agua segura continúa siendo una dificultad estructural. De acuerdo con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT, 2023), más del 25 % de la población rural no tiene acceso a agua de calidad.

En departamentos como Cesar, la situación se agrava debido a la ausencia de plantas de tratamiento y la dependencia de fuentes subterráneas sin purificación en las zonas rurales.

En este contexto, la Institución Educativa Aguas Blancas (IEAB), ubicada en el corregimiento del mismo nombre y hacer parte del municipio de Valledupar, obtiene el agua de un pozo subterráneo equipado con un sistema de bombeo. Sin embargo, el recurso hídrico no recibe ningún tipo de

tratamiento previo, lo cual representa un riesgo sanitario para los estudiantes, docentes y demás miembros de la comunidad educativa.

Ante esta problemática, la implementación del filtro lento de arena (FLA) surge como una alternativa viable, económica y ambientalmente sostenible. Este sistema integra procesos físicos y biológicos que permiten eliminar partículas, materia orgánica y microorganismos patógenos presentes en el recurso hídrico (Gallegos, P. 2023)

Este tipo de filtración comparación con otros sistemas de tratamiento, como los filtros rápidos de arena, que requieren mayores caudales, consumo energético y procesos químicos complementarios, o los sistemas de cloración, cuya eficacia puede verse limitada por la calidad inicial del agua y la correcta dosificación, el FLA presenta ventajas relevantes en contextos rurales debido a su operación sencilla, bajo mantenimiento y mínima dependencia de insumos externos. (Abdiyev *et al.*, 2023)

El funcionamiento del sistema se basa en procesos físicos como el cernido y la sedimentación, los cuales retienen las partículas suspendidas y reducen significativamente la turbidez y el color aparente del agua. Estos mecanismos permiten que el FLA mejore de forma notable las características físicas del agua, haciéndolo visualmente más claro y con menor carga de sólidos.

A nivel biológico, el filtro opera mediante la formación de una capa activa denominada biocapa, donde microorganismos como bacterias, algas y protozoos degradan la materia orgánica y eliminan patógenos

presentes en el agua mediante la depredación microbiana, la inhibición y muerte natural de los microorganismos. (Huisman & Wood, 1974)

Además, un estudio realizado por (Guanilo *et al.*, 2021) ha demostrado que la presencia de especies bacterianas en la schmutzdecke (biocapa) mejora la remoción de *E. coli* y coliformes totales, aumentando así la seguridad sanitaria del agua, demostrando que los FLA son altamente eficaces con una remoción superior al 95% en estos indicadores.

No obstante, es importante destacar que la filtración lenta de arena no está diseñada para corregir de manera significativa las características químicas del agua, como la presencia de metales pesados o compuestos disueltos. Su acción sobre estos parámetros es limitada, dado que el proceso de filtración no incluye mecanismos de intercambio iónico ni reacciones químicas específicas. Por esta razón, el FLA se considera una tecnología apropiada para mejorar principalmente las condiciones físicas y microbiológicas, pero no constituye un método de tratamiento completo cuando el agua presenta contaminantes químicos de origen industrial o agrícola.

El propósito de esta investigación es evaluar la eficiencia del filtro lento de arena como tecnología apropiada para mejorar la calidad del agua en entornos educativos rurales. En el caso de la I.E Aguas Blancas, se busca garantizar un acceso permanente a agua segura, en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 de la Agenda 2030, que promueve la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (ONU, 2015). Asimismo, la implementación de este sistema favorece la salud pública y la educación ambiental,

fortaleciendo la conciencia colectiva sobre el uso responsable del recurso hídrico.

## 2. METODOLOGIA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y experimental, orientado a determinar la eficacia de un filtro lento de arena (FLA) en el mejoramiento de la calidad del agua destinada al consumo humano en la Institución.

Se estructuró en tres fases: diagnóstico, diseño e implementación del filtro, y evaluación de su eficiencia. Esta secuencia permitió desarrollar un proceso ordenado de análisis, aplicación y validación de resultados

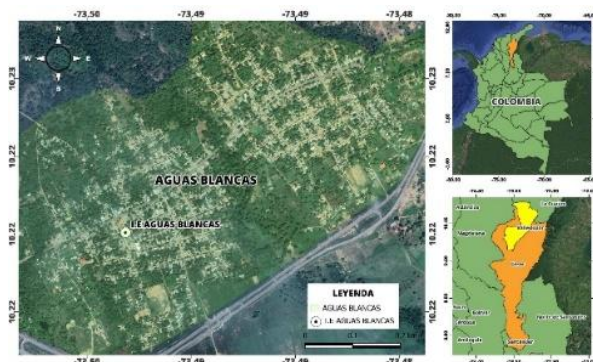
### 2.1 Etapa 1: Diagnóstico de la calidad del agua

En esta fase se realizó el reconocimiento inicial de la IEAB, identificando la ubicación de la institución (Ver figura 1), los componentes del sistema de distribución de agua y las características de la fuente de abastecimiento. Posteriormente, se efectuó un muestreo representativo del agua proveniente del pozo que suministra el recurso hídrico a la institución, siguiendo los lineamientos establecidos en el Decreto 1575 de 2007.

Se evaluaron parámetros fisicoquímicos (pH, turbidez, color aparente, conductividad, alcalinidad y dureza, entre otros) y microbiológicos (coliformes totales y *E. coli*). La caracterización se realizó mediante la aplicación de técnicas de laboratorio estandarizadas, garantizando la precisión y confiabilidad de los resultados. Según la naturaleza de cada parámetro, se emplearon

los siguientes métodos analíticos: colorimetría, titulación, turbidimetría, espectrofotometría, electrometría y filtración por membrana.

Una vez obtenidos los resultados, se procedió al cálculo del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), con el propósito de determinar el nivel de riesgo sanitario asociado al consumo del agua en la institución y establecer la necesidad de implementar medidas de tratamiento local. (Ver Figura 1)

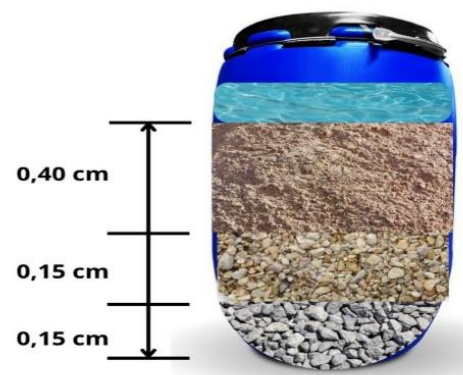


**Figura 1.** Localización del Corregimiento Aguas Blancas y la Institución Educativa.  
Fuente: Autores, 2026

## 2.2 Etapa 2: Diseño e implementación del filtro lento de arena

A partir de los resultados obtenidos en el diagnóstico, se diseñó y construyó el FLA siguiendo los criterios de “*El filtro lento de arena: manual para el armado, instalación y monitoreo*” (TORRES, C. y VILLANUEVA, S. 2014). El sistema estuvo conformado por un tanque cilíndrico de 180 litros y 46 cm de diámetro interno, lo que corresponde a un área efectiva de 0.166 m<sup>2</sup>. El control del nivel y del caudal se garantizó mediante una válvula de boya, asegurando un flujo constante durante la operación.

El lecho filtrante estuvo constituido por una capa superior de arena fina de 40 cm de espesor, con granulometría dentro del rango recomendado para filtros lentos (diámetro efectivo 0.15–0.35 mm), responsable de retener partículas finas y servir como soporte para la formación de la biocapa. En la parte inferior se dispusieron dos capas de grava, con un espesor total de 30 cm (15 cm de grava fina y 15 cm de grava gruesa), que permite una filtración mecánica progresiva (Ver figura 2).



**Figura 2.** Distribución del material granulométrico dentro del filtro. Fuente: Autores, 2026

En el fondo del tanque se instaló un sistema de ramificación o colector inferior construido con tubería de ½”, perforada y distribuida en forma de ramas, cuya función es recoger el agua filtrada de manera uniforme y conducirla hacia la salida. El filtro operó dentro del rango recomendado para FLA, con una tasa de filtración promedio de 0.20 m/h, equivalente a un caudal aproximado de 0.55 L/min (33 L/h).

En la construcción se emplearon materiales locales y de bajo costo. El sistema fue puesto en marcha de forma controlada y se permitió un período de maduración de 5 semanas para la formación de la biocapa. Durante la operación se verificó la ausencia

de fallas estructurales y la estabilidad del flujo, condiciones necesarias para la posterior evaluación de la eficiencia del sistema.

### 2.3 Etapa 3: Evaluación de la eficiencia del filtro

Después del período de estabilización, se realizaron nuevos análisis del agua tratada en la salida del filtro, utilizando los mismos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos definidos en la etapa inicial. La eficiencia del sistema se evaluó mediante la comparación de los resultados obtenidos antes y después del proceso de filtración, calculando los porcentajes de remoción para cada parámetro evaluado.

En la ecuación (1) se evidencia como se hizo el cálculo del porcentaje de remoción ( $\eta$ ) de cada parámetro, utilizada comúnmente en estudios de tratamiento de agua (Arboleda, 2000)

**Ecuación 1** Evaluación de la eficiencia del filtro

$$n = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

donde:

$\eta$  = eficiencia de remoción (%),

$C_i$  = concentración inicial del parámetro antes del tratamiento (pre-filtro).

$C_f$  = concentración final después del tratamiento (posfiltro).

El procesamiento de los datos se realizó mediante herramientas estadísticas descriptivas, lo que permitió calcular medidas promedio, y porcentajes de mejora (remoción). Estas métricas facilitaron la evaluación cuantitativa del desempeño del filtro, en función de los parámetros analizados.

Finalmente, los valores obtenidos se contrastaron con los valores obtenidos inicialmente y con los límites de referencia establecidos en la Resolución 2115 de 2007, con el fin de verificar la conformidad del agua filtrada frente a los estándares nacionales de calidad del agua para consumo humano.

## 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 3.1 Resultados

Luego de analizar los parámetros físicos y microbiológicos del agua cruda (sin tratamiento) se obtuvieron los valores de concentración correspondientes a la muestra antes de la instalación del FLA (Ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Resultados Pre-filtro

Parámetro	Resultado	Valor permisible	Puntaje IRCA
Color aparente	29	15	6
Conductividad eléctrica	363	1000	N/A
Turbiedad	4.58	2	15
pH	7.09	6,5 - 9,1	0
Dureza total	83.00	300	0
Alcalinidad total	52.00	200	0
Calcio	23.15	60	0
Magnesio	5.36	36	0
Hierro	0.104	0,3	0
Nitratos	17.40	10	1
Nitritos	< 0.1	0.1	0
Cloruros	19.50	250	0
Manganeso	< 0.1	0.1	0
Coliformes totales	987	<1	15
E. Coli	346	<1	25
Puntaje IRCA			62

**Nota:** Concentraciones de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua analizada. **Fuente:** Autores, 2026

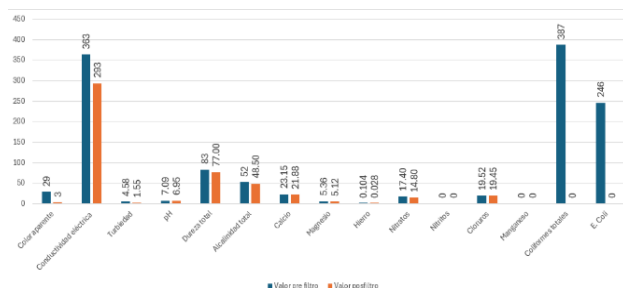
Posteriormente a la instalación del filtro, se obtuvieron los valores de concentraciones correspondientes a la muestra del agua tratada (Ver Tabla 2).

**Tabla 2. Resultados Pos-filtro**

Parámetros	Valor	Valor máximo permisible	Puntaje IRCA
Color aparente	3	15	0
Conductividad eléctrica	293	1000	0
Turbiedad	1.45	2	0
pH	6.95	6,5 - 9,1	0
Dureza total	77.00	300	0
Alcalinidad total	48.50	200	0
Calcio	21.87	60	0
Magnesio	5.12	36	0
Hierro	0.028	0,3	0
Nitratos	14.80	10	1
Nitritos	< 0.1	0.1	0
Cloruros	19.40	250	0
Manganeso	< 0.1	0.1	0
Coliformes totales	< 1	<1	0
E. Coli	< 1	<1	0
Puntaje IRCA			1

**Nota:** Concentraciones de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua tratada. **Fuente:** Autores, 2026

Los valores de las concentraciones comparadas entre las muestras prefiltro y posfiltro permiten una comprensión más clara del desempeño del FLA sobre las características evaluadas (Ver figura 3)



**Figura 3. Concentración de los parámetros evaluados en el agua cruda y el agua tratada.**

**Fuente:** Autores, 2026

Implementado el FLA, se determinaron los valores de remoción alcanzados para cada uno de los parámetros evaluados (Ver Tabla 3).

**Tabla 3. Porcentaje de remoción alcanzado en con el Filtro Lento de Arena (FLA)**

Parámetro	Pre-filtro	Posfiltro	% Remoción
Color aparente (UPC)	29	3	89.6 %
Conductividad eléctrica (µS/cm)	363	293	19.3 %
Turbiedad (UNT)	4.58	1.45	66.16 %
Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	83.0	77.0	7.2 %
Alcalinidad total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	52.0	48.5	6.7 %
Calcio (mg/L)	23.15	21.87	5.5 %
Magnesio (mg/L)	5.36	5.12	4.5 %
Hierro (mg/L)	0.104	0.028	73.1 %
Nitratos (mg/L)	17.40	14.80	14.94 %
Cloruros (mg/L)	19.50	19.40	0.51 %
Coliformes totales (UFC/100 mL)	987	<1	≈100 %
E. coli (UFC/100 mL)	346	<1	≈100 %

**Fuente:** Autores, 2026

### 3.2 Discusión

Los resultados obtenidos antes y después del proceso de filtración lenta en arena evidencian cambios representativos en la calidad física y microbiológica del agua, lo cual confirma la eficiencia del sistema para mejorar parámetros asociados como turbidez, color y microorganismos patógenos. Sin embargo, ciertos parámetros conservativos como los nitratos mantienen reducciones moderadas, propias del funcionamiento típico de este tipo de filtros.

#### 3.2.1 Comportamiento de los parámetros físicos

En la fase pre-filtro (Tabla 1), el agua presentó valores elevados de color aparente (29 UPC) y turbiedad (4.58 UNT), ambos por encima de los límites normativos (15 UPC y 2 UNT, respectivamente). Estos resultados evidencian la presencia de partículas finas, coloides y compuestos orgánicos, típicos en aguas subterráneas con influencia superficial, como lo ha registrado la Corporación Autónoma del Cesar [Corpocesar] (2006) en estudios anteriores.

Tras la filtración lenta (Tabla 2), se observó una disminución notable a 3 UPC y 1.45 UNT, correspondientes a remociones de 89.6 % y 66.16 % (Tabla 3). Estas cifras coinciden con lo reportado por (Guanilo *et al.*, 2021), quienes indican que los filtros lentos de arena (FLA) pueden alcanzar reducciones superiores al 80 % en turbidez y color gracias al desarrollo de la biocapa.

El pH se mantuvo estable (7.09 → 6.95), dentro del rango normativo (6.5–9.1), lo que evidencia que el proceso no genera alteraciones significativas en el equilibrio

ácido-base. La conductividad eléctrica disminuyó de 363 a 293  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , reflejando una retención parcial de sólidos disueltos, principalmente hierro, compuestos orgánicos y pequeñas fracciones de calcio.

#### 3.2.2 Comportamiento de los parámetros químicos: dureza, alcalinidad, calcio y magnesio.

La dureza total mostró una disminución moderada (83 → 77 mg/L), equivalente al 7.2 %, atribuida a procesos de precipitación de carbonatos y retención superficial en el lecho filtrante. La alcalinidad siguió un patrón similar (52 → 48.5 mg/L), consistente con el consumo de bicarbonatos durante procesos de oxidación biológica en la biocapa.

El calcio y magnesio presentaron reducciones menores (5–6 %), valores esperables en sistemas donde la retención de cationes es limitada. Este comportamiento concuerda con lo descrito por López, J. (2023), quien indican que los FLA no están diseñados para remover sales minerales disueltas.

#### 3.2.3 Comportamiento de metales: hierro, manganeso y zinc

El hierro total presentó una remoción considerable del 73.1 % (0.104 → 0.028 mg/L), principalmente debido a la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  y su posterior retención como hidróxidos en la capa superior de la arena. Este fenómeno está ampliamente documentado en filtros lentos y constituye uno de sus beneficios operativos. El manganeso permaneció por debajo de 0.1 mg/L en ambas fases, sin cambios significativos. El zinc mostró una reducción moderada (0.374 → 0.272 mg/L), atribuible

a adsorción en la biocapa y precipitación asociada al hierro.

### 3.2.4 Comportamiento de nitratos, nitritos y cloruros.

El parámetro más relevante en cuanto a persistencia fue el nitrato, que disminuyó de 17.40 mg/L a 14.80 mg/L, representando una remoción real de 14.94 %. Esta reducción es coherente con filtros lentos maduros, donde la disminución del nitrógeno se debe principalmente a asimilación microbiana y a desnitrificación limitada en microzonas con baja disponibilidad de oxígeno (Guanilo *et al.*, 2021).

A pesar de esta reducción, el valor final aún no cumple con el límite normativo ( $\leq 10$  mg/L), confirmando que la filtración lenta no es suficiente como método único para el tratamiento de aguas con niveles elevados de nitratos.

Los nitritos se mantuvieron  $< 0.1$  mg/L, evidenciando condiciones aerobias que favorecen su oxidación a nitratos. Los cloruros no mostraron cambios significativos (19.50  $\rightarrow$  19.40 mg/L), lo cual es consistente con su comportamiento conservativo.

### 3.2.5 Eliminación microbiológica

El filtro lento de arena mostró una eficiencia sobresaliente en la remoción microbiológica: coliformes totales (987  $\rightarrow$   $< 1$  UFC/100 mL) y *E. coli* (346  $\rightarrow$   $< 1$  UFC/100 mL), logrando eficiencias cercanas al 99.99 %. Este desempeño se debe a mecanismos de retención física, depredación, competencia microbiana y adsorción en la biocapa activa, tal como señala López, J. (2023). Este componente constituye una de las

principales fortalezas del FLA en zonas rurales.

### 3.2.6 Evaluación mediante el IRCA (Índice de Riesgo de la Calidad del Agua)

Con base en los resultados del pre-filtro, el IRCA obtenido fue de 78.48 %, clasificando el agua en el nivel de Riesgo Alto, según la Resolución 2115 de 2007. Este nivel indica que el agua no es apta para el consumo humano, debido principalmente a la presencia de microorganismos patógenos y parámetros físicos fuera de norma.

Tras el tratamiento, el IRCA descendió drásticamente debido a la remoción de turbidez, color y microorganismos, ubicándose en un rango equivalente a Riesgo Bajo, de acuerdo con el cumplimiento casi total de los parámetros críticos (turbiedad, color, *E. coli* y coliformes totales); aunque conserva limitaciones respecto a los nitratos.

### 3.2.7 Sostenibilidad y tiempos de mantenimiento

Se evidenció que el FLA mantuvo un desempeño hidráulico y de remoción estable durante un período aproximado de 12 semanas de operación continua, sin fluctuaciones significativas en la calidad del agua tratada. Este comportamiento confirma que, bajo las condiciones de carga y calidad del agua cruda evaluadas, el sistema es capaz de operar de forma eficiente durante intervalos prolongados sin requerir intervenciones frecuentes, lo cual es consistente con lo reportado para filtros lentos de arena en estudios similares (Gallegos, P. 2023).

Sin embargo, se observó un incremento progresivo en la pérdida de carga y una disminución del caudal, lo que hizo necesario realizar un mantenimiento parcial, el cual consiste en la remoción superficial de la biocapa y la sacudida del lecho filtrante.

Asimismo, tras 24 semanas de operación, se evidenció la necesidad de ejecutar un mantenimiento completo, que incluyó la limpieza integral del tanque, el lavado profundo de las capas de lecho filtrante, una renovación parcial e inspección de la red de distribución, el sistema colector inferior y los accesorios hidráulicos. Este mantenimiento permitió restablecer las condiciones operativas iniciales del filtro y asegurar la continuidad del proceso de filtración.

#### 4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la implementación del filtro lento de arena (FLA) constituye una alternativa eficiente, económica y sostenible para mejorar la calidad del agua en comunidades rurales como la I.E. Aguas Blancas, en el municipio de Valledupar, Cesar.
- El sistema logró remociones superiores al 80 % en los parámetros físicos (color aparente y turbiedad) y una eliminación casi total de coliformes totales y E. coli, alcanzando concentraciones dentro de los límites establecidos por la Resolución 2115 de 2007. Estos resultados validan la capacidad del FLA para retener partículas, materia orgánica y microorganismos patógenos, proporcionando un agua significativamente más segura para consumo humano.

- En contraste, los parámetros químicos disueltos (dureza, alcalinidad, cloruros y otros iones) presentaron variaciones mínimas, lo que evidencia que el FLA no modifica la composición mineral del agua y actúa principalmente sobre los componentes físicos y microbiológicos. En consecuencia, esta tecnología no es adecuada para tratar aguas con alta contaminación química ni para remover contaminantes disueltos como metales pesados, pesticidas, nitratos o compuestos industriales.
- Durante su implementación, el sistema operó de manera continua y sin fallas estructurales, demostrando su viabilidad técnica y su adaptabilidad a contextos educativos rurales. Además, el proyecto generó impactos educativos positivos a la comunidad en la construcción, operación y mantenimiento del filtro, fortaleciendo la educación ambiental, la responsabilidad comunitaria y la apropiación de tecnologías limpias, en concordancia con el ODS 6: Agua limpia y saneamiento.
- En conjunto, el FLA se consolida como una tecnología viable, replicable y de bajo costo para mejorar la calidad del agua en zonas rurales de Colombia. Su facilidad de operación y su alta eficiencia lo convierten en una herramienta efectiva para fortalecer la salud pública y promover la gestión sostenible del recurso hídrico en comunidades con limitaciones económicas y de infraestructura.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Popular del Cesar, especialmente a la Facultad de Ingenierías y Tecnológicas y al Programa de Ingeniería

Ambiental y Sanitaria, por su acompañamiento el desarrollo de esta investigación.

A la Facultad de Ciencias Básicas y al Programa de Microbiología, por su apoyo técnico durante las actividades de laboratorio.

A la Institución Educativa Aguas Blancas, por permitir la ejecución del proyecto en sus instalaciones y por la colaboración activa de su comunidad educativa.

Al grupo interdisciplinario Educación Rural para la Ruralidad, por su acompañamiento y apoyo en el marco de la presente investigación.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arboleda, J. (2000). *Filtración lenta de arena: una tecnología limpia para el tratamiento de agua*. Revista Ingeniería Ambiental, 12(2), 45–53.
- Guanilo, M. E., Tovar, J. A., & Díaz, R. M. (2021). *Calidad microbiológica del agua subterránea y riesgo sanitario en áreas rurales*. Revista de Salud Ambiental, 34(1), 12-21.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [MVCT] (2023). *Informe nacional de calidad del agua para consumo humano (INCA)*. <https://n9.cl/jp5rh>
- Resolución 2115 de 2007. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [MVCT]. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2010). Resolución 64/292. El derecho humano al agua y el saneamiento. <https://www.ohchr.org/es/topic/water-and-sanitation>

- Gallegos Maridueña, Paola Tatiana. (2023). *Diseño de un tratamiento de potabilización para agua subterránea empleada como fuente de consumo humano en el recinto San José, cantón Naranjito, provincia del Guayas* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21316>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2015). *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://n9.cl/ecj1>
- UNESCO. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023*. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/es>
- Huisman, L. y Wood, W. E. (1974). *Filtración lenta en arena*. Organización Mundial de la Salud. <https://iris.who.int/handle/10665/38974>
- López, J. (2023). *Remoción de patógenos mediante filtros bioarenas y filtros lentos de arena intermitentes, comunidad San Antonio de Pedregal, Lurigancho-Chosica*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6048>
- Decreto 1575 de 2007. Ministerio de Salud y Protección Social, Colombia. <https://www.minsalud.gov.co>
- TORRES, C. y VILLANUEVA, S. (2014): *El filtro de arena lento: manual para el armado, instalación y monitoreo*. Bogotá (Colombia): Universidad Piloto de Colombia (UPC), Programa de Ingeniería Civil. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4457>