

**EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN LENTA DE ARENA PARA LA
POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN EL CORREGIMIENTO DE SAN JOSÉ DE
PLAYÓN**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



Facultad de Ingeniería
Fundada en 1949

MARÍA JOSÉ RIVAS ARRIETA

WENDY JOHANA GARCÍA MÉNDEZ

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA D.T. Y C.
2017**

**EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN LENTA DE ARENA PARA LA
POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN EL CORREGIMIENTO DE SAN JOSÉ DE
PLAYÓN**

**MARÍA JOSÉ RIVAS ARRIETA
WENDY JOHANA GARCÍA MÉNDEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

**EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS, MSc, PhD
Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Cartagena**

Asesor Internacional:

**CHAD JAFVERT, Ph.D., BCEEM
Profesor de Ingeniería Civil y de ingeniería ambiental y ecológica
Purdue University**

**Grupo de Investigación Modelación Ambiental (GIMA)
Línea de Investigación: Saneamiento Ambiental**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA D.T. Y C.**

2017

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradecemos a Dios, por darnos la vocación para estudiar ingeniería civil y guiarnos hasta culminar de forma exitosa esta carrera.

A nuestras familias, por brindarnos su apoyo incondicional, por ser nuestro ejemplo de vida a seguir y por creer en nosotras aún cuando nosotras no lo hacíamos. También agradecemos a ellos por motivarnos a cumplir nuestras metas y aceptar los sacrificios que les causamos, por muchas veces no estar presentes debido al tiempo invertido en este trabajo.

De igual forma, agradecemos a nuestro director de tesis, profesor Edgar Quiñones, por guiarnos durante el proceso, enseñarnos a amar la investigación y por mostrarnos la infinidad de posibilidades que pueden desarrollarse desde la ingeniería. También al profesor Chad Jafvert por confiar en nuestro trabajo y brindarnos su apoyo, y a la profesora Dalia Moreno por su incondicional apoyo en el desarrollo de todos nuestros proyectos de investigación.

Gracias al apoyo y cooperación brindados por el grupo GEP de la Universidad de Purdue, la Corporación de Desarrollo Solidario de Bolívar, el Grupo de Investigación Modelación Ambiental (GIMA) y la vicerrectoría de relaciones y cooperación internacional de la Universidad de Cartagena. Y sin lugar a dudas gracias totales a nuestra querida Alma Máter, por acogernos y formarnos para ser excelentes profesionales.

A nuestros amigos y compañeros de clases por hacer más ameno el camino y por compartir con nosotras logros y momentos difíciles.

A todos ustedes les dedicamos todo nuestro esfuerzo, trabajo y dedicación puesto en el desarrollo de esta tesis.

“Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar”

-Nelson Mandela

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. MARCO DE REFERENCIA.....	17
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	17
2.2. ANTECEDENTES	23
2.3. MARCO TEÓRICO	26
2.3.1 Agua potable.....	26
2.3.1.1. Calidad del agua.....	26
2.3.1.2. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA).....	27
2.3.2. Tratamiento del agua potable.....	28
2.3.3. Filtración lenta de arena.....	29
2.3.3.1. Elementos de un filtro lento de arena.....	29
2.3.3.2. Descripción del proceso de filtración lenta de arena	30
2.3.3.3. Mecanismos de remoción.....	31
2.3.3.4. Hidráulica de la filtración.....	34
2.3.3.5. Requerimientos para su instalación.....	35
2.3.3.6. Purificación del agua en el filtro	36
2.3.3.7. Aplicación de los filtros	37
2.3.3.8. Ventajas y limitaciones de los filtros	38
2.3.4. Tratamientos adicionales en un sistema con filtros lentos de arena	39
2.3.4.1. Sedimentación Simple.....	40
2.3.4.2. Filtración con grava	40
2.3.4.3. Cloración de seguridad y desinfección	41
2.3.4.4. Desinfección por ebullición	41

2.4. MARCO LEGAL.....	42
2.4.1. Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2012)	42
2.4.2. Decreto 1575 del 09 de mayo de 2007	43
2.4.3. Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007	43
3. OBJETIVOS	44
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	44
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	44
4. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	45
5. METODOLOGÍA	49
5.1. DETERMINACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS ADICIONALES A LOS FILTROS LENTOS DE ARENA A UTILIZAR EN LOS SISTEMAS.....	51
5.1.1. Diagnóstico del problema de calidad de agua en San José de Playón.....	51
5.1.2. Toma de muestras	51
5.1.3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua.....	52
En la Tabla 3 se enlistan los parámetros que se analizaron para cada muestra junto con la respectiva norma que especifica la metodología desarrollada.	52
5.1.4. Selección del pretratamiento y postratamiento implementados	52
5.1.4.1. Pretratamiento	53
5.1.4.2. Postratamiento.....	54
5.2. EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FILTROS LENTOS DE ARENA CON PRETRATAMIENTOS Y POSTRATAMIENTOS A ESCALA DE LABORATORIO .	55
5.2.1. Diseño de los sistemas de filtros lentos de arena.....	55
5.2.1.1. Parámetros y Variables de diseño	57
5.2.2. Diseño de experimento	57
5.2.3. Construcción de los sistemas de tratamiento	59
5.2.3.1. Filtros lentos de arena	59
5.2.3.2. Prefiltros.....	64

5.2.3.3. Cloración.....	64
5.2.4. Operación de los sistemas de tratamiento.....	67
5.2.5. Análisis y comparación de las características del agua en cada sistema de tratamiento	68
5.2.5.1. Toma de muestras en cada etapa del sistema	68
5.2.5.2. Realización de los ensayos de referencia	69
5.2.5.3. Comparación de los resultados con la Resolución 2115 de 2007	69
5.2.5.4. Evaluación y comparación entre el funcionamiento del filtro Life Straw y los filtros lentos de arena implementados a escala de laboratorio	69
5.3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA EN LA ESCUELA DE EDUCACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA DEL CORREGIMIENTO	71
5.3.1. Obtención de los materiales para la construcción de los filtros.....	71
5.3.2. Construcción de los filtros	72
5.4. RECOMENDACIONES A LA COMUNIDAD DE PLAYÓN SOBRE LA INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS FILTROS	75
5.5. SOCIALIZACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA APTA PARA EL CONSUMO Y DEL USO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA	75
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
6.1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA DE CALIDAD DE AGUA EN SAN JOSÉ DE PLAYÓN.....	77
6.1.1. Descripción de las fuentes de agua de las que se abastece el corregimiento.....	78
6.1.1.1. Pozos Profundos (Agua Subterránea)	78
6.1.1.2. Embalse	80
6.1.1.3. Lluvia	82
6.1.2. Diagnóstico desde el punto de vista social	83
6.1.2.1. Escuela	84
6.1.2.2. Comunidad.....	84
6.2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO A ESCALA DE LABORATORIO	85

6.2.1. Operación de los sistemas.....	85
6.2.1.1. Capacidad.....	85
6.2.1.2. Tiempo de retención.....	86
6.2.1.3. Capa biológica.....	88
6.2.1.4. Velocidad media de flujo	89
6.2.2. Análisis de las muestras filtradas.....	90
6.2.2.1. Muestras filtradas con cada uno de los sistemas con SSF a escala de laboratorio	90
6.2.2.2. Muestras filtradas con el filtro LifeStraw Community	99
6.2.2.3. Comparación del filtro LifeStraw Community y los filtros lentos de arena	100
6.3. FILTROS LENTOS DE ARENA EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE SAN JOSÉ DE PLAYÓN.....	103
6.3.1. Operación de los filtros.....	103
6.3.1.1. Capacidad.....	103
6.3.1.2. Capa biológica.....	104
6.3.2. Análisis del agua filtrada	104
6.4. RECOMENDACIONES A LA COMUNIDAD DE PLAYÓN SOBRE LA INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS FILTROS	107
6.5. SOCIALIZACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA APTA PARA EL CONSUMO Y DEL USO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA	108
7. CONCLUSIONES	111
8. RECOMENDACIONES	114
8.1. RECOMENDACIONES PARA IMPLEMENTACIÓN EN OTRAS COMUNIDADES RURALES	114
8.2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS	114
8.3. LIMITACIONES DEL PROYECTO	115
ANEXOS	122

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dimensiones genéricas de un biofiltro.	18
Figura 2. Gráfico del promedio en la eficiencia de remoción de contaminantes del Filtro (Colombia-2014).	21
Figura 3. Filtros lentos de arena diseñados por estudiantes de la Universidad de Purdue.	22
Figura 4. Sistema de tratamiento por filtración en múltiples etapas.	25
Figura 5. Componentes básicos de un filtro lento de arena.	29
Figura 6. Mecanismos de transporte en la filtración lenta de arena.	32
Figura 7. Ubicación del corregimiento de San José de Playón.	45
Figura 8. Ubicación de fuentes de agua en el corregimiento de San José de Playón.	46
Figura 9. Representación esquemática de la metodología	50
Figura 10. Tren de tratamiento propuesto.	53
Figura 11. Montaje de las unidades de filtros lentos de arena a escala de laboratorio.	56
Figura 12. Esquema del proceso de los sistemas de tratamiento para cada tipo de agua. ...	58
Figura 13. Materiales obtenidos con el tamizado de la arena	61
Figura 14. Balde, mangueras y accesorios usados en la construcción de los filtros a escala de laboratorio.	61
Figura 15. Disposición de la capa de grava (A) y material de transición (B) en los filtros	62
Figura 16. Colocación de la capa de arena en los filtros a escala de laboratorio.	63
Figura 17. Unidad de filtro lento de arena	63
Figura 18. Filtro de grava como pretratamiento	64
Figura 19. Cloración del agua filtrada	66
Figura 20. Recolección de las muestras de agua del embalse y los pozos profundos en San José de Playón	67
Figura 21. Montaje del filtro LifeStraw Community	70
Figura 22. Proceso de filtración por membrana en el filtro LifeStraw Community	70

Figura 23. Descargue de la arena en la Institución de San José de Playón.....	72
Figura 24. Tamiz rotatorio de tambor diseñado por GEP usado en Playón.....	73
Figura 25. Armado de los filtros en la institución de San José de Playón	73
Figura 26. Filtros implementados en la Institución educativa de San José de Playón.....	74
Figura 27. Charlas de socialización hacia la comunidad educativa y los líderes de la comunidad en San José de Playón.....	76
Figura 28. Pozo profundo de uso público en San José de Playón, cuenca hidrogeológica Sinú-San Jacinto.....	78
Figura 29. Embalse de Arroyo Grande.	81
Figura 30. Transporte de agua en San José de Playón (2016)	85
Figura 31. Etapa inicial de la capa biológica en los filtros lentos de arena a escala de laboratorio.	88
Figura 32. Capa superficial de los filtros durante su operación.....	89
Figura 33. Gráfico de turbidez del afluente y del agua tratada en cada sistema.	92
Figura 34. Gráfico de color aparente del afluente y del agua tratada en cada sistema.	94
Figura 35. Gráfico de pH del afluente y del agua tratada en cada sistema.	95
Figura 36. Gráfico de coliformes fecales del afluente y del agua tratada en cada sistema.	96
Figura 37. Gráfico de cloro residual del agua tratada en los sistemas con postratamiento.	98
Figura 38. Comparación del sistema S4 con el filtro LifeStraw usando agua de embalse	101
Figura 39. Comparación del sistema S8 con el filtro LifeStraw usando agua de pozo	102
Figura 40. Evolución de la capa biológica de uno de los filtros.	104
Figura 41. Agua de salida de los filtros en la escuela.	105
Figura 42. Agua de salida de los filtros de la escuela: comparación con agua de entrada (a la derecha).	107
Figura 43. Portada del manual de construcción, operación y mantenimiento.	108
Figura 44. Explicación de las fases del proceso de construcción de los filtros a la comunidad	109
Figura 45. Socialización del proceso de cloración ante dos docentes de la institución educativa de Playón.....	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comportamiento típico del tratamiento de filtros lentos de arena convencionales para la purificación.	36
Tabla 2. Rendimiento de los filtros lentos de arena.	37
Tabla 3. Normas Usadas para los diferentes ensayos (S.M edición 22)	52
Tabla 4. Parámetros que intervienen en la investigación.	57
Tabla 5. Diseño de experimento de la investigación.....	58
Tabla 6. Determinación del porcentaje de pérdida del material.....	60
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua de pozo profundo en Playón (Abril 2016)	79
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua del embalse en Playón	81
Tabla 9. Información obtenida con la entrevista realizada a la comunidad.	83
Tabla 10. Tiempo de retención de los sistemas de tratamiento en el primer día de funcionamiento.	86
Tabla 11. Tiempo de retención de los sistemas de tratamiento después de dos semanas de funcionamiento.	87
Tabla 12. Tiempo de retención de los sistemas de tratamiento después de tres semanas de funcionamiento.	87
Tabla 13. Velocidad media de flujo de los sistemas de tratamiento.	90
Tabla 14. Análisis de las muestras de agua tratadas con los sistemas implementados en el laboratorio.....	91
Tabla 15. Remoción de la turbidez en cada uno de los sistemas implementados.....	93
Tabla 16. Remoción de coliformes fecales en cada uno de los sistemas implementados...	96
Tabla 17. Resumen de los resultados en la presente investigación, comparados con otros estudios	99
Tabla 18. Análisis de las muestras de agua tratadas con el filtro LifeStraw Community.	100

Tabla 19. Porcentajes de remoción del filtro LifeStraw Community.	100
Tabla 20. Análisis de las muestras de agua tratadas con los filtros lentos de arena implementados en la Institución	105

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Cotización de los ensayos para la determinación del IRCA por CARDIQUE. 122	
Anexo B. Cuestionario empleado como base para la entrevista realizada en la primera visita al Corregimiento de San José de Playón. 123	
Anexo C. Sistemas acuíferos de Colombia (IDEAM, 2013)..... 124	
Anexo D. Manual construcción, operación y mantenimiento de filtros lentos de arena para comunidades rurales 125	

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en una zona muy significativa del país que refleja la situación actual en materia de acceso al agua potable de muchas regiones rurales, como lo es el corregimiento de San José de Playón en María la Baja. En la búsqueda de una solución sostenible y adecuada a las condiciones de esta comunidad, el objetivo de esta investigación fue evaluar la filtración lenta de arena para la potabilización del agua usada para el consumo de los habitantes de este corregimiento, implementando filtros a escala de laboratorio y en la escuela de Playón, usando agua proveniente del embalse de Arroyo Grande y de los pozos profundos. Para lo cual se inició con un diagnóstico de la problemática de la calidad del agua que actualmente utilizan, demostrando que no es apta para el consumo humano. Posteriormente se implementaron sistemas de tratamiento a escala de laboratorio que consistían en filtros lentos de arena acompañados por filtración con grava y cloración, como pre y postratamiento, evaluando pH, coliformes fecales, color y turbidez como parámetros indicadores básicos de calidad del agua, con lo que se demostró su eficiencia al obtener porcentajes de remoción de turbidez y coliformes fecales por encima del 90.00%. Además se implementaron filtros en la escuela de Playón con la colaboración del grupo GEP de la Universidad de Purdue, sin embargo la operación de estos filtros se vio afectada debido a la insuficiente preparación de la arena y a un inadecuado manejo por parte de los encargados durante sus primeras semanas de funcionamiento, por lo que se obtuvieron bajos porcentajes de remoción de turbidez, nula remoción de coliformes fecales y un leve aumento del color del efluente con respecto al afluente. Los sistemas con mejor desempeño fueron aquellos que incluyeron en el tren de tratamiento la prefiltración con grava y la cloración. Sin embargo no fue posible reducir el color por debajo de 15 UPC en los filtros implementados a escala de laboratorio, ni en la escuela, por lo que el agua obtenida no era apta para el consumo según la Resolución 2115 de 2007.

Palabras claves: Filtros lentos de arena, Agua potable y comunidades rurales.

ABSTRACT

This study was conducted in a very significant area of the country which reflects the current situation in the matter of access to drinking water in many rural areas, as it is San José de Playon in María la Baja. In the search for a sustainable and appropriate solution to the issues of this community, the principal objective of this study was to evaluate the slow sand filtration method for the purification of water used for consumption of the inhabitants of the village, implementing bench scale filters and filters at the elementary and high school of Playon, using water from the Arroyo Grande reservoir and deep wells. Starting with a diagnosis of the problem of water quality that they are currently using, demonstrating that it is inadequate for human consumption. Subsequently, bench scale treatment systems were implemented, consisting of slow sand filters accompanied by gravel filtration and chlorination as pre and post-treatments, assessing pH, fecal coliform, color and turbidity as basic parameters indicators of water quality, demonstrating its efficiency reaching fecal coliform and turbidity removal rates above 90.00%. In addition, filters were implemented in the school of *San José de Playón* with the cooperation of the group GEP of Purdue University, although the operation of this filters was affected due to insufficient sand preparation and an improper use by managers during the first weeks working, therefore it was obtained low turbidity removal rates, no fecal coliform removal rate and a slight increase of the color in the effluent comparing with the influent. Systems with the best performance were those that included pre-filtration with gravel and chlorination in the treatment train. However, it was not possible to reduce color bellow 15 PCU in the bench scale filters, neither in the filters implemented in the school, for this reason, water obtained cannot be used for human consumption, according to the Resolution 2115 of 2007.

Key Words: Slow Sand Filters, Drinking water and rural communities.

1. INTRODUCCIÓN

La filtración lenta de arena ha sido ampliamente usada como método para mejorar la calidad del agua en diferentes regiones del planeta, debido a su simplicidad en la operación y a sus numerosas ventajas. En las últimas décadas estos han sido implementados a menor escala para pequeñas comunidades o para uso individual en las viviendas, teniendo gran acogida en zonas rurales de escasos recursos donde obtener agua potable no ha sido posible con los métodos convencionales, principalmente por la poca disponibilidad de recursos y las condiciones de la zona.

Se ha demostrado que los filtros lentos de arena han funcionado de manera exitosa en comunidades rurales alrededor del mundo, muchas de las cuales subsisten de manera precaria, permitiendo mejoramientos en materia de salud pública (Tiwari, Schmidt, Darby, Kariuld, & Jenkins, 2009), y en la calidad de vida de los habitantes de éstas comunidades (Malapane, 2011), incluso en Colombia se ha evidenciado su buen funcionamiento y el impacto positivo que generan (Jafvert *et al.*, 2011).

Por lo anterior, la presente investigación evaluó el método de filtración lenta de arena como alternativa para obtener agua potable en la zona rural de María la Baja, en el corregimiento de San José de Playón, el cual está ubicado al noroccidente del departamento de Bolívar, a 20 Km de la cabecera municipal. Actualmente esta comunidad recibe agua del embalse de Arroyo Grande, además cuentan con agua subterránea la cual pueden extraer de pozos profundos; sin embargo, éstas no reciben ningún tipo de tratamiento para su potabilización.

Ante esta situación la Corporación de Desarrollo Solidario de Bolívar en convenio con la Organización no gubernamental para el desarrollo (ONGD) *Ayuda en acción*, presentó un proyecto con el que se busca apoyar las dinámicas que ha ido desarrollando la Red de Acueductos Comunitarios del Norte de Bolívar para mejorar y ampliar la cobertura del sistema existente del municipio de San José de Playón.

No obstante, actualmente no se cuenta con estudios técnicos sobre calidad del agua en el corregimiento ni con una alternativa sostenible y de bajo costo para ser implementada, es por ello que la Universidad de Cartagena, a través del Grupo de Investigación Modelación Ambiental (GIMA), y con colaboración del grupo *Global Engineering Program* (GEP) de la Universidad de Purdue, mediante la presente investigación se implementó dicha alternativa en la institución educativa del corregimiento y se realizó una evaluación del método de filtración lenta en arena, contribuyendo de esta manera en el desarrollo y mejoramiento de la calidad de vida de comunidades rurales.

Esta investigación se realizó implementando sistemas de filtros lentos de arena a escala de laboratorio con el fin de tratar el agua que actualmente usa la población de San José de Playón, es decir, agua del embalse Arroyo Grande y de pozos profundos, para posteriormente medir ciertos parámetros del agua tratada y compararlos con la normatividad colombiana de agua potable para determinar si esta es apta para el consumo humano. Además, se implementaron filtros lentos de arena en la Institución Educativa Técnica y Agropecuaria San José de Playón, a la cual asisten alrededor de 900 niños cada día, y de esta manera mejorar la calidad del agua que consumen.

Se pudo constatar que los filtros lentos de arena son una buena alternativa para mejorar la calidad del agua, obteniendo altos porcentajes de remoción de turbidez, color y coliformes fecales, sin alterar otros parámetros como el pH, como también se ha obtenido en investigaciones recientes sobre el tema a nivel nacional e internacional.

Además, el estudio se llevó a cabo en una zona muy significativa que refleja la situación actual en materia del acceso al agua potable de muchas regiones rurales del país, por lo cual los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser usados como base para el desarrollo de futuros proyectos de ingeniería que brinden otro tipo de soluciones a la problemática planteada.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ESTADO DEL ARTE

En comunidades rurales como las de Kuychiro en Perú (2009), las aldeañas al río Njoro en Kenia (2009) y en Limpopo, África (2011) se han implementado filtros lentos de arena tanto a nivel domiciliario como a nivel de planta de tratamiento como sistemas alternativos para la purificación del agua de consumo humano por tratarse de métodos factibles en el aspecto económico y muy eficientes en la remoción de microorganismos patógenos y sólidos; obteniéndose porcentajes de remoción de coliformes totales y fecales que se fijan siempre por encima del 66%.

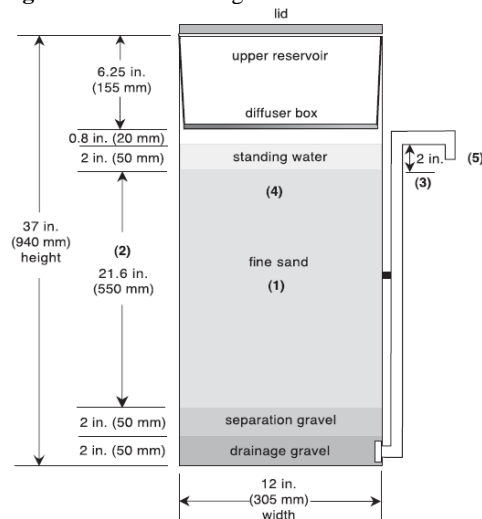
Considerando que en muchos casos fueron tratadas las aguas provenientes de ríos y embalses muy contaminados con los desechos sanitarios de las poblaciones aldeañas, esta tasa representa una gran mejoría en materia de saneamiento básico para estas comunidades y por lo tanto también representa la posibilidad mejorar en materia de salud pública, puesto que se reportó la reducción de las enfermedades de tipo diarreico especialmente en niños de las comunidades de Kenia (Tiwari *et al.*, 2009).

Adicionalmente, se ha considerado que el agua usada para el consumo en muchas comunidades rurales corresponde a agua subterránea, la cual tiene alto contenido de hierro y manganeso, por lo que la reciente publicación de Manav Demir (2016) tomó como objetivo principal la remoción de estos metales usando la filtración lenta de arena, para lo cual se operaron filtros a escala de laboratorio usando muestras de agua con concentraciones variables de hierro y manganeso, con lo que se demostró una eficiencia de remoción entre el 90 y el 95% para ambos metales.

Además en los sistemas de filtración lenta, al funcionar como mecanismos biológicos que mejoran las condiciones físicas, químicas y microbiológicas del agua, rara vez es necesaria la utilización de tratamientos químicos, como lo manifiesta Ephrem Guchi (2015), quien igualmente opina que esta tecnología ha sido reconocida como apropiada para el tratamiento del agua de consumo en zonas rurales por su alta efectividad para remover patógenos y para reducir la turbiedad, por lo que también representa una disminución en la incidencia y prevalencia de enfermedades.

Se han propuesto múltiples alternativas para los materiales de construcción de los filtros, entre los cuales se encuentra el concreto, el plástico, el metal o incluso contenedores indígenas, y en cuanto al material constituyente del lecho filtrante se recomienda que no sea arena de playa ni de los fondos de los ríos, ya que los granos son muy redondeados, lisos y de tamaño uniforme, lo cual no permite la adecuada formación y adherencia de la capa biológica del filtro (Schmutzdecke), y es en ella donde radica la funcionalidad y eficiencia del filtro. En la Figura 1 se muestra un filtro lento de arena con las dimensiones recomendadas para su adecuado funcionamiento (Lea, 2014).

Figura 1. Dimensiones genéricas de un biofiltro.



Fuente: (Biological Sand Filter: Low-Cost Bioremediation Technique for Production of Clean Drinking Water, 2014).

Uno de los aspectos más significativos a considerar sobre los filtros lentos de arena es la capa biológica que se forma en la superficie del lecho filtrante, debido a su importancia, se han realizado investigaciones sobre su formación y las condiciones bajo las cuales debe permanecer para garantizar la eficiencia del filtro; Lea (2014) concluyó que el tiempo de maduración de esta capa es de aproximadamente 30 días, asimismo recomienda que el agua cruda debe ser suministrada de forma intermitente con un régimen constante con periodos de pausa de mínimo 1 hora y máximo 48 horas, la temperatura debe ser ideal para la formación de los microorganismos y además es preciso asegurar que reciba el oxígeno necesario para los procesos metabólicos.

Sin embargo, para investigaciones de corta duración tiempos de espera de 30 días no resultan convenientes para el desarrollo de los proyectos, aún menos cuando se requiere cambiar el afluente al sistema de tratamiento de filtros lentos de arena, puesto que es necesario esperar a que se reestructure la capa biológica y se adapte a las nuevas condiciones de nutrientes del nuevo afluente.

Dada esta situación Jellison, Dick y Weber-Shirk (2000), investigaron la posibilidad de modificar los filtros lentos de arena con un agente capaz de actuar como un adsorbato en los granos de arena y como un floculante para las partículas presentes en el agua; de esta forma, este agente sería capaz de reducir el tiempo de maduración e incrementar la eficiencia de los filtros lentos de arena, como resultado se obtuvo que existe un polímero denominado “POL-E-652” capaz de causar la maduración del filtro en 24 horas y que comparado con un filtro sin este agente, pudo reducir la turbidez del agua al punto de consumo, cuando en el filtro sin el polímero aún no tenía tendencia a madurar la capa biológica, por lo que aún no se obtenía agua mejorada (Jellison, Dick, & Weber-Shirk, 2000).

La tendencia en materia de filtros lentos de arena a nivel internacional consiste en buscar la manera de optimizarlos y lograr una buena relación costo – beneficio y de esta manera poder implementarlos especialmente en comunidades rurales.

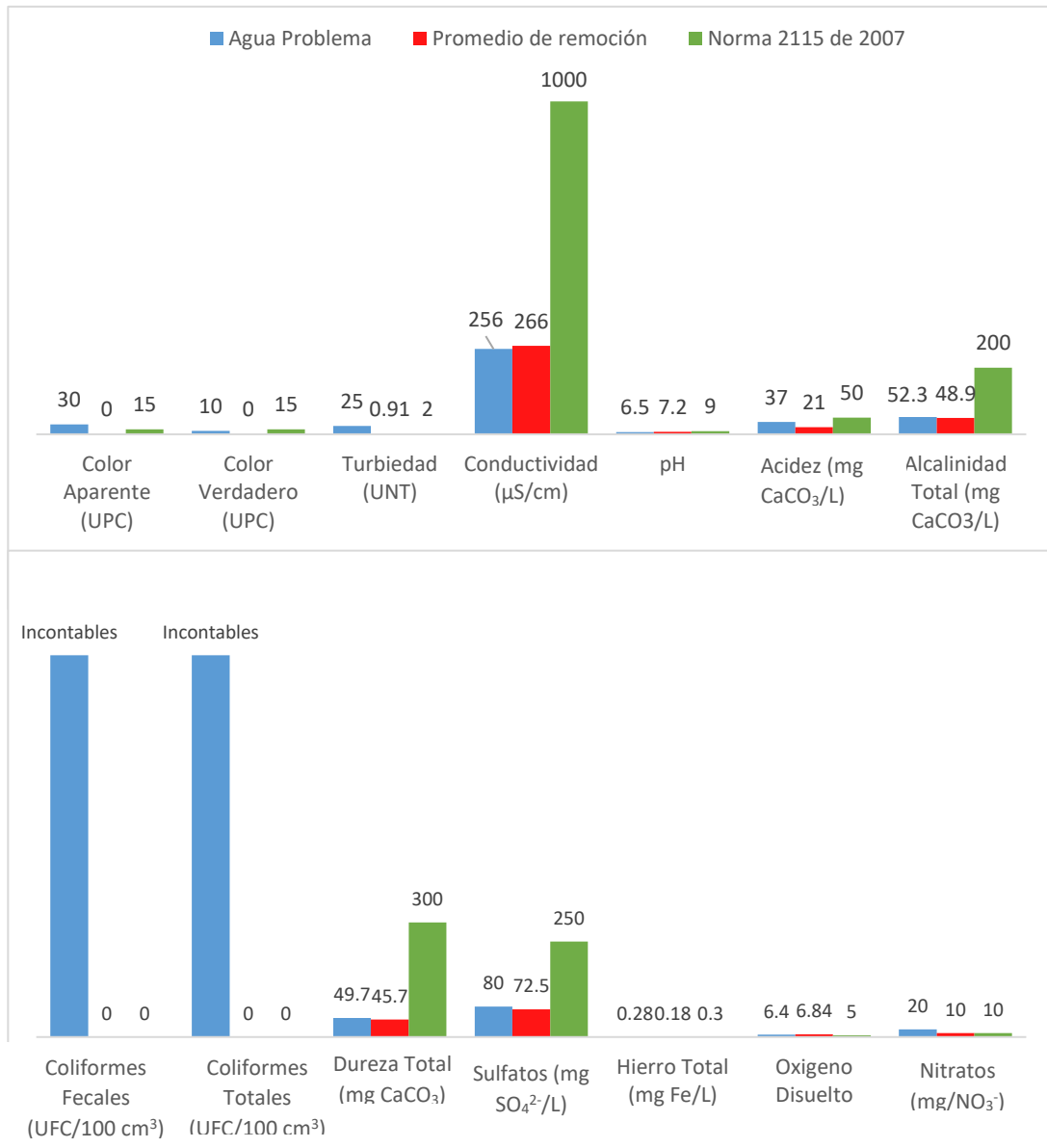
De igual forma, en Colombia se han realizado estudios acerca de la implementación de filtros lentos de arena para mejorar la calidad del agua que algunas comunidades rurales están recibiendo para su consumo, iniciando con una fase experimental en el laboratorio para probar la efectividad de estos filtros antes de implementarlos en las comunidades, teniendo en cuenta diferentes parámetros del agua potable y las normas que los regulan. La mayoría de estas investigaciones han evaluado sus resultados comparando la calidad del agua filtrada con lo establecido en la normatividad establecida por el Ministerio de la Protección y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, analizando parámetros como color, turbidez, coliformes fecales, pH, y otros, como se muestra en la Figura 2 (Torres Parra & Villanueva Perdomo, 2014); sin embargo, en un estudio realizado para la instalación de los filtros en comunidades rurales cerca a Barbosa en el departamento de Antioquia, solo se midieron tres parámetros, turbidez, demanda de cloro y bacterias coliformes, y fueron compararlos con los estándares de agua potable establecidos por la Organización Mundial de la Salud, puesto que esto fue realizado por una universidad estadounidense (Jafvert, y otros, 2011).

La eficiencia del uso de filtros lentos de arena ha sido demostrada para la potabilización del agua en comunidades rurales en Huila (Aguar Hernández & Portela Cuevas, 2009) y Cundinamarca (Torres Parra & Villanueva Perdomo, 2014), llegando a la conclusión de que el sistema de filtros lentos de arena para uso doméstico es viable para zonas en las cuales no se tiene acueducto, puesto que mejora las condiciones microbiológicas y fisicoquímicas del agua problema.

No obstante, la filtración lenta de arena no siempre funciona como método para mejorar la calidad del agua hasta el punto de consumo, como fue constatado por Österdahl en un estudio realizado a varios filtros lentos de arena domésticos implementados en zona rural del departamento de Huila en Colombia, ya que encontró que la mayoría de los filtros estudiados parámetros como el color aparente, turbidez y coliformes totales, aumentaban luego del proceso de filtración, probablemente debido al que el material granular usado estaba compuesto principalmente por tamaños de partículas demasiado grandes, a que la

profundidad del lecho de arena no era suficiente y al inapropiado mantenimiento por parte de los beneficiarios de los filtros, a causa de una mala asesoría e indicaciones por parte de los proveedores de los filtros (Österdahl, 2015).

Figura 2. Gráfico del promedio en la eficiencia de remoción de contaminantes del Filtro (Colombia-2014).



Fuente: (Torres Parra & Villanueva Perdomo, 2014).

Acorde con los resultados obtenidos por Jafvert *et al.* (2011), el filtro mejoró la calidad del agua en gran medida, aunque fue necesario hervirla para eliminar bacterias que permanecieron luego de ser filtrada el agua, por lo que se propone que para futuros diseños se use cloro o cartuchos de filtración para remover las bacterias en lugar de hervir el agua. Por lo tanto, con esta investigación, además de desarrollar los filtros lentos de arena se tienen en cuenta algunos post-tratamientos o pretratamientos como la filtración con grava para reducir la turbidez, para lo cual por cada sistema se usaron baldes plásticos de 5 galones, como se muestra en la Figura 3, donde el balde superior contiene el pre-filtro de grava que conduce el agua hasta el inferior que contiene el filtro lento de arena.

Figura 3. Filtros lentos de arena diseñados por estudiantes de la Universidad de Purdue.



Fuente: (Drinking Water Issues in Rural Colombia, 2011).

Es importante resaltar que para el inicio del funcionamiento de los filtros lentos de arena como un sistema para obtener agua potable, primero se debe desarrollar la capa biológica que se forma en la parte superior del estrato de arena, durante un periodo de maduración, que para algunos autores nacionales corresponde aproximadamente a tres semanas (Aguiar Hernández & Portela Cuevas, 2009) mientras que en otras investigaciones se ha señalado que hasta 30 días es suficiente (Lea, 2014).

2.2. ANTECEDENTES

La calidad de vida de los habitantes del corregimiento de San José de Playón luego de los estragos sufridos por el conflicto armado en los Montes de María, ha constituido un importante tema de investigación para la Corporación de Desarrollo Solidario (CDS), principalmente desde el ámbito social, detectando la carencia del servicio de agua potable como una gran problemática actual. Por lo cual, la CDS en convenio con la Organización no gubernamental para el desarrollo (ONGD) *Ayuda en acción*, ha presentado un proyecto titulado “Agua potable y organización comunitaria para la población rural del norte del Departamento de Bolívar – Colombia” (2015), con el cual se busca apoyar las dinámicas que ha ido desarrollando la Red de Acueductos Comunitarios del Norte de Bolívar, la cual está conformada por una asociación de diez organizaciones comunitarias prestadoras de servicios de agua y saneamiento dentro de las poblaciones rurales, por medio de capacitaciones en temas legales, ambientales y gerenciales, y finalmente se pretende el mejoramiento y la ampliación de la cobertura del sistema existente del municipio de San José de Playón.

La Organización Canal Voluntarios, bajo la colaboración local de la CDS y la ONGD *Ayuda en acción*, propuso otro proyecto referente a la calidad del agua en el corregimiento de San José del Playón, titulado “Promover el derecho humano al agua potable para la comunidad de San José de Playón, Departamento de Bolívar, Colombia”, con el cual se busca propiciar una respuesta viable de acceso al agua potable para 5 000 personas en San José de Playón, partiendo de dos alternativas: optimizar el sistema existente de captación superficial (embalse) o, el aprovechamiento de fuentes subterráneas. Las dos opciones a través de cuatro fases: elaboración de línea de base, estudios de factibilidad, diseño e implementación. Todo con el apoyo transversal del comité de agua y de la red de acueductos regional (Canal Voluntarios, 2015). Aunque es importante mencionar que este aún no se ha llevado a cabo, solo se presentó la propuesta en el mes de enero del año 2015.

Sin embargo, luego de una exhaustiva búsqueda de los antecedentes de la problemática de agua potable en el corregimiento de San José de Playón es posible afirmar que no se han realizado estudios que proporcionen información técnica de la calidad del agua que actualmente está siendo suministrada a la comunidad del corregimiento, por lo que este proyecto representaría la primera fuente de información que será de gran utilidad para los proyectos que se desean realizar en el tema de recursos hídricos y agua potable en la zona.

En cuanto al sistema de tratamiento de agua que se propone con este proyecto, el cual consiste en filtros con material granular, ha sido abordado en algunas investigaciones en la Universidad de Cartagena. A nivel de pregrado, se desarrolló una tesis en el programa de Ingeniería Civil (Julio, Palacio, & Villabona, 2007), en la que se evaluó el proceso de filtración con aguas sintéticas a tasa constante con turbiedades de 16 a 24 UNT, usando una planta piloto de filtración conformada por tres torres de filtros, cuyo lecho filtrante consistía en capas de antracita, arena y grava, con la que se midió el grado de remoción de turbidez, obteniendo una eficiencia de la planta de 99%.

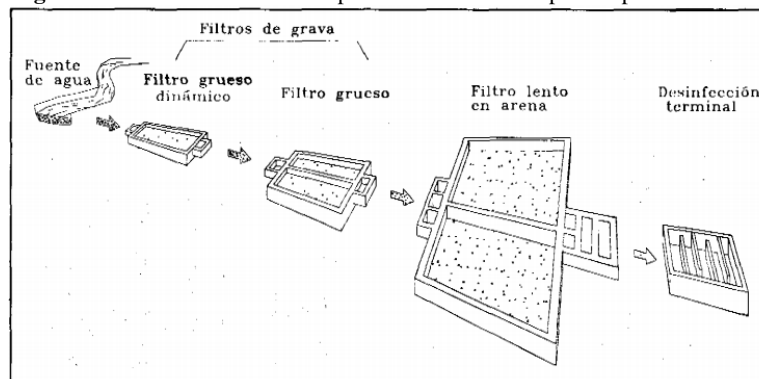
También a nivel de posgrado se ha estudiado el tema de la filtración a través de lechos granulares, mediante una tesis de especialización (Villabona, 2006) en la que se utilizó agua sintética con un rango de operación de turbidez del afluente entre 16 y 25 UNT y para una tasa constante de 15 ml/s, se obtuvo un porcentaje de remoción de turbidez del 96% en la misma planta piloto descrita en el estudio de pregrado.

A nivel nacional, la filtración lenta de arena ha sido estudiada en investigaciones recientes y en otras más antiguas, que lo proponen como una respuesta a la necesidad de alternativas de tratamiento de agua de fuentes superficiales. El centro internacional de agua y saneamiento (IRC) con cooperación del Centro Inter-regional de Abastecimiento y Remoción de Agua (CINARA), desarrolló un proyecto integrado de investigación y demostración para probar en terreno el proceso de filtración lenta de arena, y formular guías prácticas para su aplicación en los países en desarrollo, entregando como producto final consideraciones de diseño para plantas de tratamiento usando este tipo de filtración, el cual tomó como ejemplo cuatro

plantas de filtración lenta en arena en Cali, Colombia (Visscher, Paramasivam, Raman, & Heijnen, 1992).

Posteriormente, en el año 1999, el instituto CINARA junto con la Universidad del Valle estudió una tecnología de filtración en múltiples etapas (Galvis Castaño, Latorre Montero, & Visscher, 1999), la cual es una combinación de dos tipos de pretratamiento con filtración en grava y tratamiento con filtración lenta en arena como se muestra en la Figura 4, teniendo en cuenta que esta tecnología ya había tenido gran acogida en Colombia desde mediados de la década de los 80s con plantas de tratamiento que operaban de esta forma, como la planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico y la planta de tratamiento de la parcelación El Retiro en Cali. Con lo cual se evaluaron cada una de las etapas del tratamiento, midiendo los parámetros de turbiedad, coliformes, color y sólidos suspendidos para diferentes velocidades de infiltración, comprobando que la desinfección puede aplicarse de manera confiable, puesto que a pesar de que se obtuvo valores de turbiedad superiores a 1 UNT, la contaminación bacteriológica fue baja. Por lo anterior, se debe analizar muy bien las características del agua problema antes de diseñar el sistema, puesto que, a pesar de los diferentes niveles de filtración, aun no fue necesario para llevar la turbiedad a los límites permisibles.

Figura 4. Sistema de tratamiento por filtración en múltiples etapas.



Fuente: (Galvis Castaño, Latorre Montero, & Visscher, 1999).

A partir de la búsqueda realizada, se puede afirmar que solo en los últimos años, se ha estudiado en Colombia la posibilidad de implementar los filtros lentos de arena como sistema

de tratamiento a nivel domiciliario y no como un proceso en las plantas de tratamiento. A nivel mundial, se tiene el registro de que la primera planta de tratamientos con filtros lentos de arena fue construida en Londres en 1829 (Arboleda Valencia, 1975), sin embargo, no se conoce exactamente cuándo se instaló por primera vez filtros lentos de arena a menor escala.

2.3. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan algunos conceptos y teorías necesarias para la elaboración de esta propuesta, referentes al agua potable, su tratamiento y a los filtros lentos de arena como alternativa para obtener agua apta para el consumo humano.

2.3.1 Agua potable

El agua potable se define, según el RAS como agua que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el Decreto 475 de 1998, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012).

El agua potable muy rara vez es encontrada en estado natural, debido a ello, es necesario captar agua de los recursos naturales ya sea de fuentes superficiales como ríos, lagos, arroyos, canales, lagunas y embalses o de fuentes subterráneas profundas o subsuperficiales y someterla a un proceso de tratamiento (Orellana, 2005).

2.3.1.1. Calidad del agua

La calidad del agua es el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia (Ministerio de la protección social, 2007). Ésta presenta variaciones temporales y

espaciales gracias a la influencia de factores externos e internos del cuerpo de agua. (Ramírez, 2011).

Las características y criterios de la calidad del agua para consumo humano se determinan mediante una serie de análisis de tipo microbiológico, físico y químico, con los cuales se comparan los parámetros y sus valores límite correspondientes establecidos en los capítulos II y III de la Resolución 2115 de 2007.

En concordancia con lo estipulado en el RAS, la Organización Mundial de la Salud establece que las características generales de una buena agua para consumo se dan cuando el agua está libre de patógenos, de sustancias tóxicas y de un exceso de minerales y materia orgánica y para que sea agradable debe estar libre de color, turbidez, sabor y olor, además, el contenido de oxígeno en el agua deber ser suficientemente alto (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978).

2.3.1.2. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA)

El IRCA corresponde al índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, establecido en la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

Para el cálculo del IRCA se ha asignado un puntaje de riesgo a cada de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas en la resolución 2115, de tal forma que si el parámetro no cumple con lo establecido en la norma se le asigna este puntaje, calculando el índice como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$IRCA = \frac{\sum \text{Puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100 \quad (Ec. 2.1)$$

El valor del IRCA es cero puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas en la Resolución y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos.

2.3.2. Tratamiento del agua potable

El agua tratada es aquella a la cual sus características físicas, químicas y biológicas han sido cambiadas o variadas con el fin de emplearla en algún uso benéfico (Ramírez, 2011). Cabe destacar que la calidad del agua tratada depende del uso que se le vaya a dar, de igual modo, los métodos de tratamiento pueden variar dependiendo del uso al que esté destinado el agua.

El tratamiento del agua potable puede darse de dos formas, mediante sistemas convencionales de tratamiento y mediante sistemas no convencionales de tratamiento. Los primeros hacen referencia a los procesos llevados a cabo en las plantas convencionales de tratamiento, entre estos se encuentran: Coagulación – Floculación, sistemas de filtración, procesos de membrana, desinfección química/oxidante, sistemas de absorción e intercambio iónico, sistemas de extracción con aire y tratamiento solar.

Por otro lado, los sistemas no convencionales de tratamiento de agua potable se refieren a los mecanismos de fácil acceso, poco valor monetario, bajos costos de mantenimiento y/o realizados con materiales poco comunes encontrados en la zona de estudio, estos sistemas son destinados en gran medida a poblaciones vulnerables, las cuales no cuentan con los recursos suficientes para la instalación de una planta de tratamiento de agua potable (Granados & Peña, 2016).

Entre los sistemas no convencionales se pueden destacar:

- Coagulación y floculación empleando Mandioca o Yuca, semillas de moringa.
- Filtros de mesa, como los filtros de vela filtrante, los filtros de vela de carbón con prefiltro de arena y los filtros de arena.
- Filtro de arena a nivel domiciliario
- Desinfección mediante radiación solar, cloración o hirviendo el agua

2.3.3. Filtración lenta de arena

La filtración lenta de arena es un proceso mediante el cual es posible mejorar la calidad del agua, éste consiste en filtrar lentamente el agua no tratada a través de una cama porosa de arena, el agua entra a la superficie del filtro y luego drena por el fondo (National Environmental Service Center, 2015).

2.3.3.1. Elementos de un filtro lento de arena

En la Figura 5 se presentan los componentes básicos que constituyen un filtro lento de arena que se describen a continuación:

Figura 5. Componentes básicos de un filtro lento de arena.



Fuente: (Filtros, 1999).

- Reserva de agua cruda: capa de agua en la parte superior que se encuentra sobre el estrato de arena fina, su principal función es la de mantener una cabeza constante de agua sobre el filtro, esta cabeza proporciona una presión hidráulica que empuja el agua a través del filtro (Huisman & Wood, 1974).
- Schmutzdecke (lodo biológico o piel de filtro): capa constituida por material de origen orgánico que se forma con el tiempo, a través de la cual debe pasar el agua antes de llegar al medio filtrante. Esta capa está formada principalmente por algas y otras numerosas formas de vida, como plankton, protozoarios y bacterias contenidas en el agua problema.

Las cuales se estabilizan en los poros de los medios filtrantes por el efecto de la gravedad (Torres Parra & Villanueva Perdomo, 2014).

- Lecho de arena: medio para que la comunidad de microorganismos se desarrolle sobre él, además es en esta capa donde se desarrolla la mayor parte del proceso físico de la filtración. Este medio debe estar compuesto por granos duros y duraderos, libres de arcilla y materia orgánica. El diámetro efectivo usualmente está entre 0.15 mm – 0.35 mm, ha sido demostrado experimentalmente que tanto el material más fino como el más grueso de este rango trabajan satisfactoriamente en la práctica, por lo que al final la selección tendrá que depender de los materiales locales disponibles (Huisman & Wood, 1974). Usualmente se coloca en la parte inferior del lecho una capa de arena más gruesa que permita una mejor transición entre la capa de grava y la capa de arena.
- Grava de soporte: las capas de grava tienen dos funciones, soportar el lecho de arena y proporcionar salida del agua más fácilmente desde la base del lecho de arena. Las rocas que conforman estas capas deben ser duras, preferiblemente redondas, y debe estar libre de arena, arcilla, suciedad y de materia orgánica (Huisman & Wood, 1974).
- Sistema de drenaje: asegura la recolección uniforme del agua a través de toda el área de filtración. Las capas de grava deben cubrir en su totalidad este sistema de drenaje (Blacio Ordóñez & Palacios Pérez, 2011).

2.3.3.2. Descripción del proceso de filtración lenta de arena

En principio, el agua cruda que ingresa al filtro, permanece cierto tiempo sobre el medio filtrante, tiempo que depende de la velocidad de filtración. Durante este periodo las partículas más pesadas que se encuentran en suspensión se sedimentan y las más pequeñas tienden a formar flóculos.

En la capa superior de la superficie filtrante, la cual corresponde a la arena, se forma una película delgada denominada *schmutzdecke* constituida por una gran variedad de microorganismos, biológicamente muy activos, sin embargo, se requiere un tiempo de maduración entre 3 y 5 semanas para la formación del mismo (Aguiar Hernández & Portela

Cuevas, 2009). Los microorganismos que conforman la película biológica se estabilizan en los poros de los medios filtrantes gracias al efecto de la gravedad y actúan de manera tal que atrapan, digieren y degradan la materia orgánica contenida en el agua. Cabe destacar que se debe mantener un nivel de agua constante sobre el *schmutzdecke* para posibilitar la subsistencia de los microorganismos que lo componen.

Posteriormente el agua sigue avanzando a través del medio filtrante y el material en suspensión es removido por cernido y otros procesos como la adherencia resultante de la acción de las fuerzas eléctricas, acciones químicas y atracción de masas, por lo que disminuye la turbidez y también disminuye el color. Por otro lado, en el espacio vacío del medio filtrante se llevan a cabo procesos de sedimentación.

Debido a los procesos que se efectúan, la superficie de las partículas del material filtrante también es revestida por una película biológica similar al *schmutzdecke* con bajo contenido de algas, pero con un gran número de bacterias, las cuales continúan absorbiendo impurezas y otros residuos. En la parte inferior del medio filtrante disminuye la cantidad de alimento produciéndose así otro tipo de bacterias, las cuales utilizan el oxígeno disuelto en el agua y los nutrientes que se encuentran en solución (Cánepa, *Filtración lenta como proceso de desinfección*, 1994).

Finalmente, el agua fluye a través de la capa inferior conformada por grava y es recolectada mediante una tubería de salida.

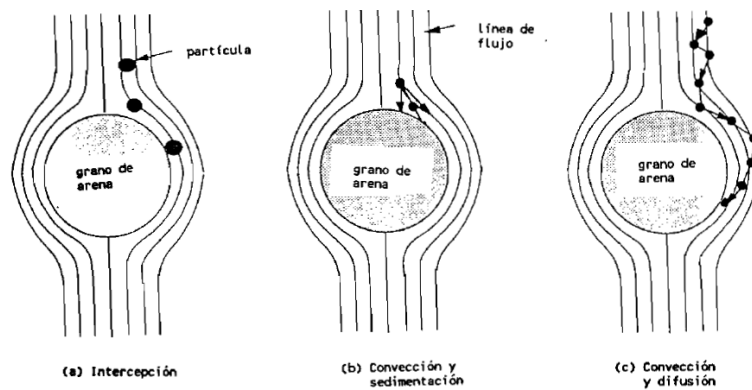
2.3.3.3. Mecanismos de remoción

Existe un coeficiente de remoción del filtro (λ), el cual puede ser determinado por medio de dos componentes que son: el coeficiente de probabilidad de colisión (η) y el coeficiente de adherencia (α), los cuales, a su vez, son expresados mediante los mecanismos de remoción de un filtro lento de arena: transporte, adherencia y biológico (Cánepa, 1992).

- **Mecanismos de transporte:** En esta etapa se dan procesos principalmente hidráulicos, bajo condiciones de flujo laminar y considerando que el grano de arena se comporta como una obstrucción que interrumpe el flujo del agua. En la Figura 6 se muestran los diferentes mecanismos mediante los cuales ocurre la colisión entre las partículas y los granos de arena.

Se define el coeficiente η como la oportunidad de colisión entre una partícula y un grano de arena y el número de colisiones por unidad de desplazamiento determina el potencial de remoción mediante la filtración (Cánepa, 1992).

Figura 6. Mecanismos de transporte en la filtración lenta de arena.



Fuente: (Filtración Lenta: Teoría y Evaluación, 1992).

- *Cernido:* Actúa únicamente en la superficie de la arena y sólo con las partículas cuyo tamaño sea mayor al de los espacios dejados por la arena. El cernido puede ocasionar colmatación de la capa superficial afectando así el resto del proceso de filtración.
- *Intercepción:* Consiste en la colisión de una partícula con un grano de arena cuando la primera es conducida mediante una línea de flujo muy cerca al grano de tal manera que roce con la superficie de éste.
- *Sedimentación:* Ocurre gracias a la fuerza de gravedad que actúa sobre las partículas cuya masa es suficiente para superar la densidad del agua en el que se encuentran.

- *Difusión:* Se da cuando una partícula es conducida por una línea de flujo y repentinamente cambia su trayectoria moviéndose de una línea de flujo a otra, pudiendo eventualmente colisionar con un grano de arena.
- **Mecanismos de adherencia:** La remoción será efectiva sólo si ocurre adherencia en los granos de arena, entonces se define el coeficiente α como la fracción de partículas que se adhieren en relación con el número de colisiones ocurridas, antes de la formación del schmutzdecke su valor es cero (Cánepa, 1992).

Algunas investigaciones sugieren que la adherencia en primera instancia se ve favorecida por el desarrollo de la película biológica del filtro, la cual proporciona a los granos de arena una superficie adsorbente. Existe otra postura que plantea que la adherencia se da gracias a que las enzimas extracelulares se encargan de coagular las partículas.

- **Mecanismo biológico:** Luego de la formación de la película biológica, la tasa de remoción de coliformes es de aproximadamente 2 a 4 logaritmos, por lo que el valor de α se aproxima a 1 (Cánepa, 1992), lo cual indica que tal vez el componente más importante de los filtros lentos de arena es el Schmutzdecke, en el que además de la adherencia ocurre la predación por parte de los microorganismos que lo conforman.

Es importante aclarar que la cantidad de microorganismos contribuyentes en el mecanismo biológico se encuentra limitado por el contenido de materia orgánica y nutrientes en el agua cruda y va de la mano de un fenómeno de mortalidad concomitante, durante el cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas; de este modo, la materia orgánica degradable presente en el agua, es gradualmente descompuesta en agua, dióxido de carbono y sales como sulfatos, nitratos y fosfatos, que son descargados en el efluente de los filtros (Cánepa, 1992).

2.3.3.4. Hidráulica de la filtración

El comportamiento hidráulico del filtro de arena depende en gran medida de la velocidad de filtración. Para que un filtro de arena pueda ser catalogado como lento, la velocidad de filtración v_f , debe estar en el rango:

$$0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h} \leq v_f \leq 0.4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Para garantizar que la velocidad se encuentre dentro de los valores correspondientes, es necesario hallar la altura de la columna de agua que permita vencer la resistencia que genera la arena y a su vez controlar la velocidad de flujo en el medio filtrante (Piñol, 2009).

Considerando que el agua seguirá un régimen laminar en su filtración y mantendrá una presión constante en la entrada, es posible usar la ley de Darcy, en forma general:

$$q = -k\nabla h \quad (\text{Ec. 2.3})$$

El flujo de agua que pasará por el filtro viene controlado por:

- El nivel de agua cruda H_1
- El nivel de agua tratada H_2
- La velocidad de filtración v_f

Adaptando la Ley de Darcy a un filtro genérico, se obtiene la siguiente ecuación:

$$(H_1 - H_2) = \frac{v_f}{k} L \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

L es el espesor de la capa de arena, en m

k es el coeficiente de permeabilidad, en cm/s

H_1 es el nivel de agua cruda, en m

H_2 es el nivel de agua tratada, en m

v_f es la velocidad de filtración en la arena, en cm/s

Es importante considerar que a medida que el tiempo transcurre, la velocidad de filtración disminuirá, debido a la acumulación de partículas en la arena, disminuyendo también el valor de la permeabilidad, por ello Piñol (2009) recomienda que el nivel de agua cruda se mantenga constante y se controle la velocidad de filtración en la salida del agua tratada, y de este modo se puede saber cuándo la permeabilidad del filtro baja al punto de que es necesario realizarle mantenimiento.

2.3.3.5. Requerimientos para su instalación

Para la instalación de los filtros lentos de arena se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Características de la población: Se deben efectuar estudios sociológicos para determinar las costumbres y creencias que pueden afectar la aceptación del sistema, comprobar la información demográfica y de salud pública disponible y estudiar la incidencia de enfermedades de origen hídrico y presencia de vectores en la zona de estudio.
- Recursos disponibles en la zona: Determinar los recursos humanos y materiales disponibles para adecuar el diseño del sistema (Torres Parra & Villanueva Perdomo, 2014).
- Calidad del agua cruda: el agua a tratar no debe tener altos niveles de turbidez, de tal forma que no exceda de 15 NTU, ni altos niveles de color, menor a 20 UPC y coliformes fecales máximos de 500 UFC (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012). Cuando altos niveles de turbidez están presentes en el agua se requiere desarrollar pretratamientos como sedimentación o pre-filtración con grava (World Health Organization, 2014).
- Ubicación del filtro: para garantizar que el filtro opere de forma adecuada, este debe instalarse en un lugar lejos de la luz solar, el viento, la lluvia y los animales, preferiblemente dentro de la casa, al nivel del suelo para que el agua pueda ser fácilmente vertida en la parte de arriba (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology, 2008).

2.3.3.6. Purificación del agua en el filtro

Los filtros lentos de arena pueden proveer una excelente calidad de tratamiento de agua, ya que han demostrado constantemente su efectividad en el retiro de partículas suspendidas con turbiedades en los efluentes por debajo de 1.0 UNT, alcanzando de un 90 a más de 99% de reducción en bacterias y virus, y ofreciendo un retiro virtualmente completo de los quistes *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium oocyst* (National Environmental Services Center, 2009). En la Tabla 1 se muestra el comportamiento típico del tratamiento de filtros lentos de arena convencionales, es decir, los parámetros de calidad que se obtienen luego de filtrada el agua.

Tabla 1. Comportamiento típico del tratamiento de filtros lentos de arena convencionales para la purificación.

Parámetro de Calidad del Agua	Capacidad de Eliminación
Turbidez	< 1.0 UNT
Coliformes	1 – 3 unidades log
Virus entéricos	2 – 4 unidades log
Quiste <i>Giardia</i>	2 – 4 unidades log
<i>Cryptosporidium Oocysts</i>	> 4 unidades log
Carbón Orgánico Disuelto	< 15 – 25%
Carbón Orgánico Disuelto Biodegradable	< 50%
Precusores del Trihalometano	< 20 – 30%
Metales Pesados Zn, Cu, Cd, Pb	> 95 – 99%
Fe, Mn	> 67%
As	< 47%

Fuente: (National Environmental Services Center, 2009).

La mayor eliminación de impurezas, así como la considerable mejora de la calidad física, química y bacteriológica del agua cruda, tiene lugar en el lecho de arena y, especialmente en el Schmutzdecke, en la parte superior del lecho filtrante (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978). El rendimiento de los filtros se mide a partir de su efecto purificador, como se explica en la Tabla 2.

Tabla 2. Rendimiento de los filtros lentos de arena.

Parámetro	Efecto Purificador
Materia orgánica	Los filtros lentos de arena producen un efluente claro, virtualmente libre de materia orgánica.
Bacterias	Puede eliminarse entre el 99% y 99.99% de bacterias patógenas; las cercarias de esquistosoma, los quistes y huevos son eliminados aun con mayor grado. E. Coli reduce entre 99% y 99.9%.
Virus	En un filtro lento ya maduro los virus se elimina en forma virtualmente total
Color	El color se reduce en forma significativa.
Turbiedad	De preferencia, la turbiedad de agua debe ser menor de 5 NTU, para un filtro lento diseñado y operado con propiedad, la turbiedad del efluente será menor de 1 NTU.

Fuente: (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978).

2.3.3.7. Aplicación de los filtros

La filtración lenta en arena es un método eficiente para la eliminación de materia orgánica y de organismos patógenos, por lo que es particularmente apropiado para aguas superficiales que contienen cantidades indeseables de esas impurezas (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978). Los filtros lentos de arena también pueden ser usados con otras fuentes de agua como agua lluvia y aguas subterráneas de pozos profundos (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology, 2008).

Según el RAS 2012, la filtración lenta de arena puede usarse en plantas de tratamiento de agua potable como tratamiento final del agua cruda prefiltrada (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012). Además, estos filtros pueden ser usados a nivel doméstico como un dispositivo de tratamiento casero o de “uso individual”. En este caso, el agua a filtrarse puede obtenerse del lugar de provisión de agua más cercano, ya sea un río, arroyo o pozo, se transporta físicamente hasta el filtro y se usa inmediatamente después. Por lo tanto, la provisión, el tratamiento y la distribución del agua están completamente bajo el control del morador de la casa. La independencia de la casa hace que la tecnología de los

filtros lentos de arena sea adecuada para su uso efectivo en los países en desarrollo, que a menudo carecen de la dirección y procesos reglamentarios necesarios para constituir sistemas multifamiliares efectivos y eficaces (Aguar Hernández & Portela Cuevas, 2009).

2.3.3.8. Ventajas y limitaciones de los filtros

A continuación, se presentan las principales ventajas y limitaciones del uso de filtros lentos de arena como dispositivo para potabilizar el agua.

▪ Ventajas

En comparación con varios otros métodos de tratamiento diseñados para la remoción de materia orgánica, de organismos patógenos, de turbidez y de color, la filtración lenta en arena tiene muchas ventajas. Es la única operación unitaria conocida que consigue tan alto grado de mejora simultánea en la calidad física, química y bacteriológica del agua cruda (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978).

Además, tiene otras ventajas como:

- Simplicidad en la construcción, operación y mantenimiento, puesto que no requiere de habilidades especiales.
- Altamente aceptado por los usuarios debido a que es fácil de operar y mejora la apariencia y sabor del agua, lo cual puede ser apreciado inmediatamente.
- Alta funcionalidad en las viviendas, debido a que el suministro, el tratamiento y la distribución están bajo el control de cada una de estas (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology, 2008).
- No requiere de energía, dado que el proceso es llevado a cabo por gravedad y no tiene partes mecánicas.
- Amigable con el medio ambiente, ya que no requiere de químicos que puedan contaminar cursos cercanos de agua y los lodos que se obtienen como residuo en el mantenimiento se pueden utilizar como fertilizantes naturales para cultivos.

- Bajo costo, que se puede disminuir aún más utilizando técnicas locales y personal de la propia comunidad (Blacio Ordóñez & Palacios Pérez, 2011).

- **Limitaciones**

Los filtros lentos de arena presentan ciertas limitaciones, tales como el tratamiento de agua con niveles altos de turbidez, puesto que puede tapar rápidamente la arena fina de estos filtros, si no se le aplica un pretratamiento al agua con una turbidez mayor a 15 NTU. Además, las aguas con muy bajo contenido de nutrientes pueden perjudicar el retiro de la turbidez, puesto que algunos nutrientes deben estar presentes para promover el crecimiento del ecosistema biológico dentro del lecho de filtro.

Los filtros lentos de arena no retiran completamente todos los químicos orgánicos, sustancias inorgánicas disueltas, como algunos metales pesados, y son menos efectivos al retirar microorganismos del agua fría porque a medida que la temperatura decrece, la actividad biológica dentro del lecho de filtro disminuye.

Por otro lado, el agua con arcillas muy finas no es tratada fácilmente usando filtros lentos de arena (National Environmental Services Center, 2009).

2.3.4. Tratamientos adicionales en un sistema con filtros lentos de arena

En algunos casos la filtración lenta de arena debe acompañarse de algunos pretratamientos o postratamientos para garantizar que el agua filtrada sea apta para el consumo humano, lo cual se presenta cuando el agua problema tiene altos niveles de contaminación que pueden producir un mal funcionamiento del filtro, produciendo en muchos casos su taponamiento o mala calidad en el agua filtrada. Los pretratamientos corresponden a procesos físicos y biológicos que acondicionan la turbidez del agua dentro de los límites aceptables por un filtro lento de arena (Pérez Carrión & Canepa de Vargas, 1992), mientras que los postratamientos buscan principalmente destruir patógenos y evitar una futura contaminación.

A continuación, se presentan algunos de los tratamientos adicionales que usualmente se implementan para complementar la acción de los filtros lentos de arena.

2.3.4.1. Sedimentación Simple

Si el agua cruda tiene un contenido relativamente alto de materia en suspensión, se debe instalar una unidad de pretratamiento para prevenir la rápida obstrucción del filtro lento de arena como la sedimentación simple, la cual puede aplicarse a aguas crudas con turbidez promedio anual entre 20 y 100 UNT. Así pues, un reservorio de sedimentación sirve principalmente al propósito de reducir la turbidez y de eliminar las sustancias en suspensión. El tiempo de retención debe ser suficiente para permitir que los sólidos en suspensión se asienten (partículas de mayor densidad que el agua) o floten (partículas de menor densidad que el agua) (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978).

2.3.4.2. Filtración con grava

Los filtros de grava son usados principalmente como pretratamiento para los sistemas de filtros que no pueden tolerar altos niveles de turbidez o sólidos suspendidos en el agua. Este consiste en un tanque con las mismas condiciones del empleado para los filtros lentos de arena, en el cual se emplea material granular más grueso como medio filtrante. El lecho es diseñado para que el tamaño de la grava vaya disminuyendo con la dirección del flujo, el cual puede variar entre 25 a 5 mm, y la grava de soporte tiene las mismas características que la usada en el filtro lento de arena (Itaca, 2005).

La velocidad o tasa de infiltración de diseño debe estar aproximadamente entre 0.5 y 1.0 m/h. La turbidez eliminada varía en total entre 60 – 75% (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978).

2.3.4.3. Cloración de seguridad y desinfección

La desinfección sirve para destruir organismos patógenos que pueden causar diversos tipos de enfermedades hídricas. La cloración de seguridad proporciona una medida de prevención contra futura contaminación que puede ocurrirle a un agua bacteriológicamente segura. Si las condiciones son aceptables y es muy bajo el riesgo de que ocurra contaminación bacteriológica es posible decidirse a confiar en las propiedades de reducción bacteriológica del propio filtro lento de arena.

Para el medio rural de los países en desarrollo, las sustancias químicas más adecuadas para estos procesos son cloruro de cal e hipoclorito de alta graduación; la elección se hace principalmente en base a la disponibilidad y los costos en cada país o área particular. Estas sustancias químicas se caracterizan por un cierto contenido de "cloro disponible" que es el componente desinfectante activo. El cloruro de cal también conocido como cal clorada contiene entre 20 y 35% de cloro disponible, mientras que los compuestos de hipoclorito calcio de alta graduación contienen entre 60 y 70 %. Dependiendo de la calidad del agua que se va a desinfectar, se añade entre 0.5 y 2 mg de cloro disponible a cada litro de agua (Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS, 1978).

2.3.4.4. Desinfección por ebullición

La desinfección por ebullición consiste en elevar la temperatura del agua a 100° C y mantener esa condición por espacio de uno a cinco minutos. El resultado es la eliminación de la mayoría, sino de todos, los microorganismos presentes (Solsona & Méndez, 2002).

La acción del calor por un tiempo prolongado y a la temperatura de ebullición causa la muerte de todo tipo de agentes patógenos, pero el alto costo requerido para hacer hervir el agua es prohibitivo en la industria y en los servicios, por lo que solo a nivel casero o doméstico es aceptable esta práctica y de hecho se emplea en comunidades donde no se cuenta con infraestructura para una desinfección convencional y es posible conseguir combustibles baratos o sin costo como la leña (Oocities, 2009).

2.4. MARCO LEGAL

A continuación, se presenta la normatividad que actualmente rige para el sector de agua potable en Colombia.

2.4.1. Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2012)

En este Reglamento se señalan los requisitos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos operativos que se utilicen en la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo y sus actividades complementarias. La última actualización del Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico corresponde al RAS-2012, sin embargo, aún no se tiene el acto administrativo con que se adopte esta actualización.

Este Reglamento está dividido en 10 títulos (A – J), sin embargo para la presente propuesta de investigación se hará uso principalmente de lo establecido en el título C que hace referencia a los sistemas de potabilización (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012), enfatizando en los parámetros que establecen la calidad de la fuente de agua a tratar y la calidad del agua tratada, además en este título se describen diferentes métodos o etapas para el tratamiento de agua potable, entre los cuales está la filtración lenta. También se hará uso del título J que presenta alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural.

Para el presente proyecto se usó principalmente de lo establecido en el título C (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012), enfatizando en los parámetros que establecen la calidad de la fuente de agua a tratar y la calidad del agua tratada, además en este título se describen diferentes métodos o etapas para el tratamiento de agua potable, entre los cuales está la filtración lenta.

2.4.2. Decreto 1575 del 09 de mayo de 2007

Este Decreto fue expedido por el Ministerio de la Protección Social, con el objeto de establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada. Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios.

Se estableció que los criterios y valores máximos aceptables que debe cumplir el agua para el consumo humano, serían determinados por los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en un plazo no mayor a un (1) mes contado a partir de la fecha de publicación del decreto (Ministerio de la protección social, 2007) .

2.4.3. Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007

Fue expedida por el Ministerio de la Protección y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, luego de publicado el decreto No. 1575 del 09 de mayo de 2007, con el fin de señalar características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

En este se establecen los valores máximos aceptables de las características físicas y químicas del agua para consumo humano (Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el método de filtración lenta de arena para la potabilización del agua usada para el consumo de los habitantes de San José de Playón, implementando filtros diseñados por el grupo de GEP de la Universidad de Purdue, tanto a escala de laboratorio como en la comunidad de Playón, usando agua proveniente del embalse de Arroyo Grande y de los pozos profundos, con el fin de proponerlo como alternativa para mejorar la calidad del agua a nivel domiciliario.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar pretratamientos (filtración con grava o sedimentación) y postratamientos (cloración o ebullición) adicionales a los filtros lentos de arena, en caso de ser requeridos, a partir de lo obtenido con la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua proveniente del embalse de arroyo grande y los pozos profundos.
- Evaluar los procesos seleccionados de pretratamiento y postratamiento, mediante la implementación de sistemas de tratamiento a escala de laboratorio, considerando la turbidez, color, pH y coliformes fecales del afluente y efluente de dichos sistemas.
- Implementar filtros lentos de arena en la escuela de educación primaria y secundaria del corregimiento, con el apoyo del grupo de Global Engineering Program de la Universidad de Purdue, para mejorar la calidad del agua que reciben los estudiantes.
- Proponer recomendaciones para la instalación, operación y mantenimiento de los filtros lentos de arena en el corregimiento de San José de Playón.
- Promover nuevos conocimientos en materia de saneamiento en la comunidad de San José de Playón a través de una campaña de socialización sobre la calidad del agua apta para el consumo, y el uso y funcionamiento de los filtros lentos de arena como método para purificar el agua.

4. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

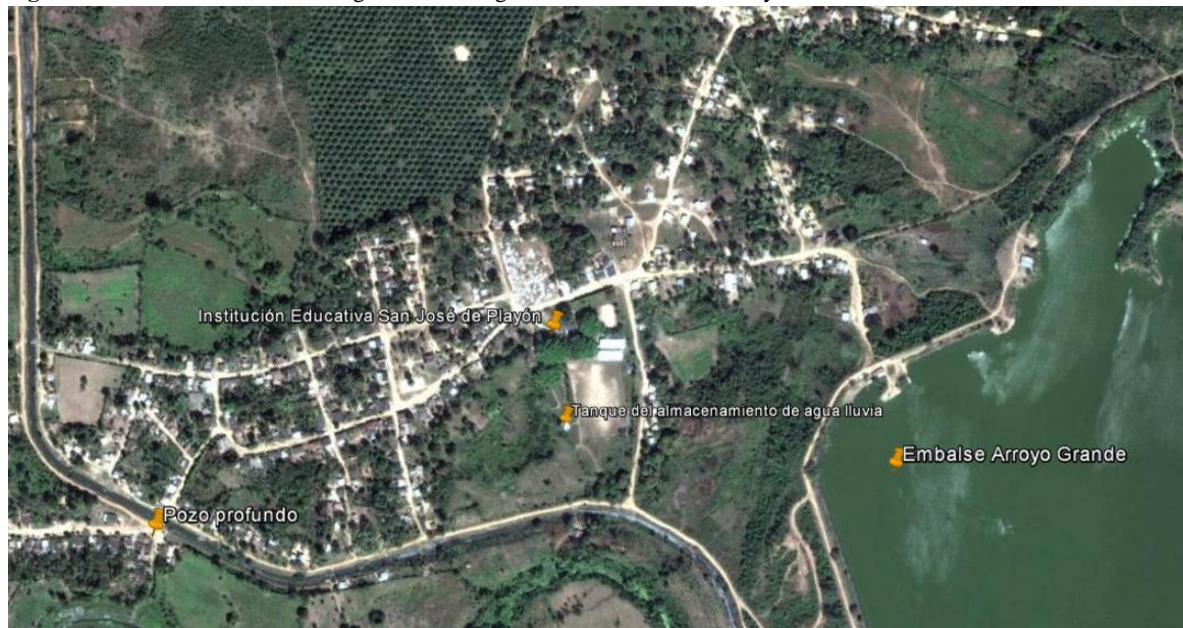
Este proyecto de investigación se realizó con base en la situación actual del corregimiento de San José de Playón, el cual hace parte de la zona rural del municipio de María la Baja, ubicado al noroccidente del departamento de Bolívar, en las subregiones de Canal del Dique y de Montes de María, a 20 km de la cabecera municipal, como se muestra en la Figura 7. El corregimiento se encuentra localizado entre las coordenadas de Norte a Sur desde $9^{\circ}53'14.23''$ N y $75^{\circ}19'56.69''$ O, hasta $9^{\circ}52'25.52''$ N y $75^{\circ}19'57.47''$ O; y de Oeste a Este, desde $9^{\circ}52'46.37''$ N y $75^{\circ}20'28.06''$ O, hasta $9^{\circ}53'6.46''$ N y $75^{\circ}19'16.99''$ O. No se tiene información de la extensión superficial del corregimiento; sin embargo, se sabe que toda el área rural del municipio de María la Baja corresponde a 541.28 km^2 , la cual incluye sus 11 corregimientos. Según el POT de María la Baja, San José de Playón tiene una población aproximada de 5122 habitantes (Alcaldía de María La Baja, 2001).

Figura 7. Ubicación del corregimiento de San José de Playón (Modificada de Google Maps).



La investigación se inició en el primer semestre del año 2016 con una fase de diagnóstico, en la que se pudo conocer el grado de satisfacción de los habitantes en cuanto al agua que actualmente reciben y se estudió la calidad de esta agua, por medio de una caracterización fisicoquímica y microbiológica. A partir de lo cual se evaluaron diferentes sistemas de tratamiento usando filtros lentos de arena a escala de laboratorio durante el segundo semestre del 2016, tomando como variables independientes las etapas del sistema de tratamiento, es decir, la ausencia o presencia de tratamientos anteriores o posteriores a dichos filtros, para determinar si el agua filtrada era apta para el consumo humano, realizando un análisis fisicoquímico de esta, en los que se midieron variables como turbidez, color, pH y coliformes fecales, comparándolos con los valores máximos establecidos en la Resolución 2115 de 2007. De esta forma la investigación tuvo una duración de 17 semanas.

Figura 8. Ubicación de fuentes de agua en el corregimiento de San José de Playón.



Fuente: Google Earth, 2016

A través del desarrollo del presente proyecto se contemplaron resultados esperados como la obtención de agua potable a partir de muestras de agua provenientes del embalse de Arroyo Grande y los pozos profundos que se encuentran en el corregimiento de San José de Playón (ver Figura 8), luego de aplicado un proceso de tratamiento empleando filtros lentos de arena

a escala de laboratorio, con el fin de proponerlo como alternativa para mejorar la calidad del agua a nivel domiciliario. También se obtuvo la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua que actualmente se suministra a la comunidad de San José de Playón, la cual representa la primera fuente de información para la realización de futuras investigaciones académicas y proyectos en materia de recursos hídricos, saneamiento y calidad del agua, entre otros, debido a que hasta el momento no se contaba con dichos estudios.

Además, la construcción de filtros lentos de arena a escala de laboratorio constituye el producto principal del proyecto, ya que mediante ellos es posible mejorar la calidad del agua, evaluando diferentes formas de implementar el método de filtración lenta de arena. Probablemente el uso de filtros lentos de arena por sí mismos no garantiza la obtención de agua potable, por lo que se propuso una alternativa que incluyó el uso de sistemas compuestos por dicho método y un pretratamiento o un postratamiento. Esta investigación permitió la adaptación de una tecnología existente en la comunidad beneficiada por medio de campañas educativas donde se presentaron los resultados del estudio y se sensibilizó a la comunidad sobre la importancia del agua potable.

Las principales limitaciones que se presentaron para llevar a cabo la evaluación del método de filtración lenta de arena fueron de tipo económica y espacial, la primera limitación se dio debido a que el laboratorio de sanitaria de la Universidad de Cartagena no se encuentra equipado para realizar todos los ensayos pertinentes a caracterización del agua, esto condujo a que fueran realizados por terceros a quienes debió remunerarse económicamente; por otro lado, la determinación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), un parámetro importante para la caracterización del agua potable, no fue posible debido a que requería de ensayos muy costosos que se encuentran fuera del alcance económico de los estudiantes. En el anexo A se encuentra la cotización enviadas por la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE), donde se constata el precio de los ensayos de caracterización de las muestras de agua y de determinación del IRCA.

Por otro lado, la investigación estaba limitada espacialmente puesto que el corregimiento de San José de Playón, está ubicado a aproximadamente 110 km de la ciudad de Cartagena, lo cual implicaba viajar durante más de dos horas para arribar al sitio de estudio y transportar las muestras de agua tomadas para la realización de los ensayos iniciales y posteriormente para su tratamiento con los filtros lentos de arena.

Debido a estas limitaciones no fue posible determinar el periodo óptimo de maduración del schmutzdecke, ya que en su determinación influyen factores como una constante toma de muestras de agua filtrada para determinar el estado de sus características luego del proceso de tratamiento y el suministro permanente del agua de la fuente, por lo tanto se consideró un periodo de maduración de tres semanas, como el considerado por Lea en su estudio “*Biological Sand Filter: Low-Cost Bioremediation Technique for Production of Clean Drinking Water*” (2014).

5. METODOLOGÍA

Este proyecto presenta un enfoque integrado multimodal, es decir, un enfoque mixto debido a que integra las ventajas de la investigación cualitativa en lo que respecta a la forma de obtención de datos sobre la comunidad de estudio (Hernández & Fernández, 2010), puesto que para la caracterización del problema fue necesario realizar entrevistas a la comunidad y evaluar las experiencias personales de los habitantes del corregimiento de San José de Playón en materia de calidad del agua de consumo.

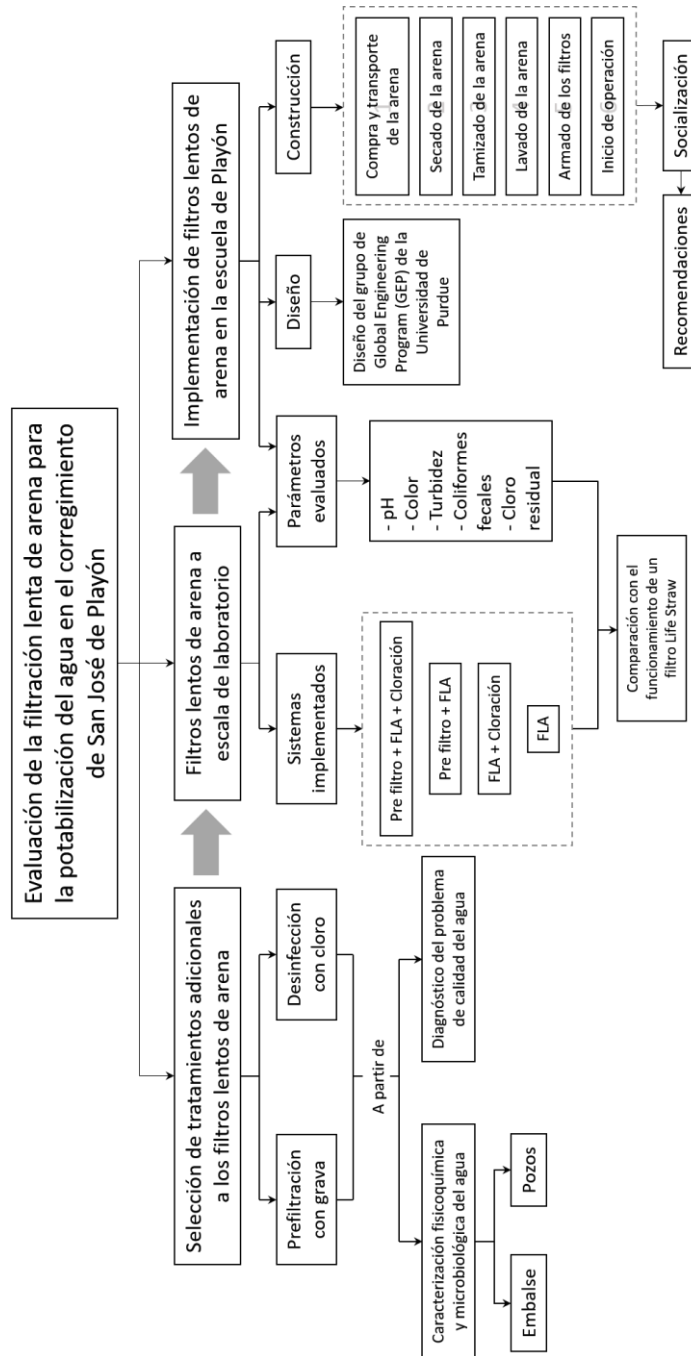
Por otro lado, se aplicaron los métodos cuantitativos en el análisis de los datos y resultados obtenidos a partir de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras de agua antes y después de los procesos de tratamiento implementados.

La investigación realizada es de tipo experimental y estudio de caso según las definiciones dadas en Tamayo y Tamayo (2002), puesto que se desarrollaron ensayos de laboratorio usando sistemas de filtros lentos de arena implementados a escala de laboratorio, variando los tratamientos adicionales en cada sistema, para establecer si esta agua obtenida era apta para el consumo a partir de la medición de parámetros como la turbidez, color, coliformes fecales y pH. Además, corresponde a un estudio de caso, ya que se desarrolló de acuerdo a la problemática actual del corregimiento de San José de Playón sobre la calidad del agua que la comunidad está usando para el consumo.

Acorde con los objetivos de esta investigación, la metodología fue desarrollada en cinco fases durante 17 semanas, iniciando con el diagnóstico de la situación problema y la determinación de pretratamientos y postratamientos adicionales a los filtros lentos de arena a utilizar en los sistemas, para posteriormente implementarlos a escala de laboratorio, con el fin de analizar las muestras tratadas en este sistema. Seguidamente, se realizó la implementación de filtros lentos de arena en la escuela de la comunidad de San José de Playón con el apoyo del Global Engineering Program de la Universidad de Purdue. Teniendo todos los resultados y análisis

se llevó a cabo la última fase que consistió en la socialización sobre la calidad del agua apta para el consumo y el uso y funcionamiento de los filtros lentos de arena. En la figura 9 se resume la metodología seguida en esta investigación.

Figura 9. Representación esquemática de la metodología



5.1. DETERMINACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS ADICIONALES A LOS FILTROS LENTOS DE ARENA A UTILIZAR EN LOS SISTEMAS

La determinación de pretratamientos y postratamientos adicionales a los filtros lentos de arena a utilizar en los sistemas inició con el diagnóstico del problema de calidad de agua en San José de Playón y posteriormente se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua proveniente del embalse Arroyo Grande y los pozos profundos, ya que a partir del grado de contaminación física, química y microbiológica se determinó el pretratamiento y el postratamiento óptimo para el caso de estudio.

5.1.1. Diagnóstico del problema de calidad de agua en San José de Playón

El diagnóstico del problema de calidad del agua en San José de Playón consistió en una fase netamente cualitativa, en la cual se realizó una visita de inspección al corregimiento, para visualizar las fuentes de agua y los mecanismos como esta llega a las viviendas, e interactuar con la comunidad para conocer su perspectiva acerca del problema de calidad del agua y cómo se ven afectados con esto, lo cual se realizó por medio de entrevistas en nueve viviendas de la comunidad, basándose en el cuestionario de preguntas abiertas que se encuentra en el Anexo B, por lo tanto, con las entrevistas solo se obtuvo información verbal, siguiendo un estilo relativamente informal, que podría definirse como una conversación con propósito explícito (Meneses & Rodríguez, 2011), tratándose de una recolección de información cualitativa no fue necesario que la muestra fuera determinada con precisión, ya que como lo menciona Dávila (1999) en la investigación cualitativa este aspecto es relativamente indiferente.

5.1.2. Toma de muestras

Se tomaron dos muestras de un litro del agua que los habitantes del corregimiento de San José de Playón usan diariamente, la selección de la muestra una muestra de agua de la red de tuberías, proveniente del embalse Arroyo Grande, y la segunda muestra corresponde a agua extraída de uno de los pozos profundos de uso público.

Se siguió la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-1, 2 y 3 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995), en las cuales se especifican las condiciones en que se debe tomar la muestra, es decir, en puntos representativos y usando recipientes esterilizados y libres de contaminantes (algunos de ellos proporcionados por el laboratorio de CARDIQUE, dónde fueron realizados los ensayos); y cómo preservarla antes de realizar los ensayos en el laboratorio, en este caso para la mayoría de los análisis a realizar bastaba con mantener la muestra entre 1.00 y 5.00 °C durante un máximo de 24 horas hasta su llegada al laboratorio. Las muestras tomadas corresponden a muestras instantáneas o en el sitio, ya que son muestras discretas que fueron tomadas aleatoriamente con relación al tiempo y lugar.

5.1.3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua

A cada una de las muestras recogidas se le realizaron ensayos de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos siguiendo los lineamientos propuestos en el Standard Methods para el análisis de agua y agua residual (Rice, Baird, Eaton, & Clesceri, 2012), excepto el ensayo de coliformes fecales, el cual se llevó a cabo con el método de filtración por membrana.

En la Tabla 3 se enlistan los parámetros que se analizaron para cada muestra junto con la respectiva norma que especifica la metodología desarrollada.

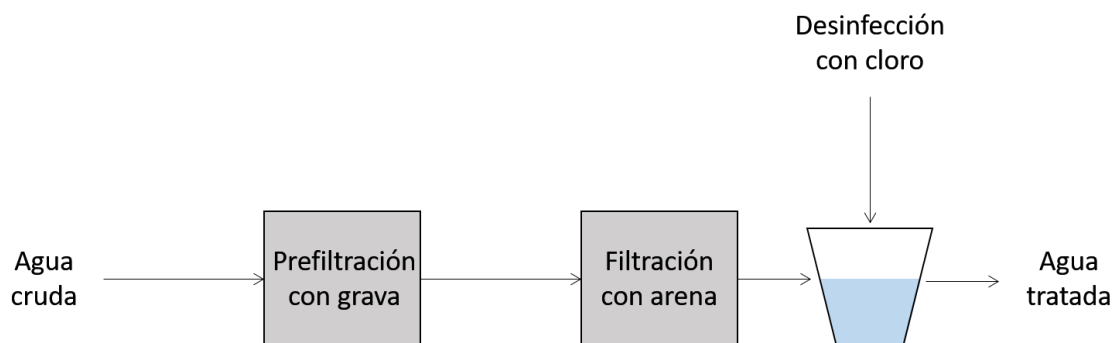
Tabla 3. Normas Usadas para los diferentes ensayos (S.M edición 22)

Parámetros	Metodología
pH	S.M 4500-H+B
Conductividad	S.M 2510 B
Color	S.M 2120 B
Turbidez	S.M 2130 B
Alcalinidad Total	S.M 2320 B
Dureza Total	S.M 2340-C
Cloruros	S.M 4500-Cl ⁻
Sulfatos	S.M 4500-SO ₄ ²⁻
Hierro Total	S.M 3030-E;3111-B
Manganeso	S.M 3030-E;3111-B

5.1.4. Selección del pretratamiento y postratamiento implementados

Teniendo los resultados de los parámetros analizados, estos fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 2115 de 2007 (Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). A partir de los parámetros que estuvieron fuera del límite permisible establecido por la norma, se propuso la prefiltración con grava como una alternativa de pretratamiento y la desinfección por cloración como alternativa de postratamiento, que en conjunto con los filtros de arena disminuyeron estos valores, mejorando la calidad del agua. En la Figura 10 se muestra el tren de tratamiento propuesto para la potabilización del agua proveniente del embalse Arroyo grande y subterránea del corregimiento.

Figura 10. Tren de tratamiento propuesto.



5.1.4.1. Pretratamiento

Según el RAS 2012, la filtración lenta de arena se puede emplear como tratamiento único de la calidad del agua cruda cuando ésta mantiene una turbiedad no mayor a 15 UNT (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012), sin embargo para el agua del embalse se presentó una turbidez de 16.63 UNT, la cual supera el límite establecido, por lo que fue necesario implementar tratamientos adicionales que disminuyan la turbidez del agua antes de ser tratada con el filtro lento de arena.

Entre los pretratamientos más usados para reducir la turbidez del agua a tratar están el tanque de almacenamiento, sedimentación simple y la prefiltración, o filtración preliminar rápida

“gruesa”. Sin embargo los sistemas con tanque de almacenamiento o sedimentación simple requieren de mayor tiempo para reducir la turbidez del agua, siendo necesario un tiempo mínimo de retención que permite que los sólidos en suspensión se asienten, en el caso de partículas de mayor densidad que el agua, o floten, cuando haya partículas de menor densidad que el agua, lo cual constituye una gran desventaja para sistemas de potabilización del agua domiciliarios o in situ, en los cuales se usa el agua inmediatamente después de tratada, mientras que para la filtración preliminar rápida “gruesa”, se va obteniendo el efluente en la que medida que se le adiciona el agua.

Por lo anterior, se seleccionó la prefiltración de grava o filtración preliminar rápida “gruesa” como pretratamiento adicional en el sistema de filtración lenta de arena, para el cual se usó grava local, es decir, de la región aledaña al corregimiento de San José de Playón, para conformar el lecho filtrante.

5.1.4.2. Postratamiento

Los filtros lentos de arena mejoran significativamente la calidad del agua, ya que además de remover partículas que causan turbidez, reducen olores y sabores problema, así como el número de patógenos en el agua, sin embargo, no los remueve en su totalidad y debido a que en ambas fuentes de agua analizadas se encontró presencia de coliformes fecales, es fundamental que ésta sea desinfectada luego del proceso de filtración.

El método de desinfección por cloración fue seleccionado para dicho fin debido a que resulta económico en comparación con otros métodos como la ebullición o la desinfección con luz ultravioleta (UV), ya que sólo hay que invertir en el cloro, o blanqueador común, el cual se encuentra normalmente en supermercados.

La desinfección alcanza una eficiencia máxima cuando el agua tiene una turbidez cercana a la unidad (Barrenecha & De Vargas, 2004), por ello es un buen complemento a los filtros lentos de arena, ya que éstos permiten reducir la turbidez a niveles cercanos a 1 UNT.

Adicionalmente, según los resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos al agua del embalse y subterránea del corregimiento de San José de Playón, el pH de dichas muestras se mantiene en el rango de 6.5 a 9, lo cual hace que se conozca la tendencia de formación del ión hipoclorito, el cual predomina en un $\text{pH} > 7.5$, y del ácido hipocloroso, el cual predomina en un $\text{pH} < 7.5$, considerando que la desinfección es más eficiente con niveles bajos de pH dado que se favorece la formación del ácido hipocloroso, 80 veces más eficaz que el ión hipoclorito (Junta de Castilla y León, Consejería de Sanidad, 2009).

5.2. EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FILTROS LENTOS DE ARENA CON PRETRATAMIENTOS Y POSTRATAMIENTOS A ESCALA DE LABORATORIO

Para evaluar la filtración lenta de arena acompañada de un pretratamiento y postratamiento se realizó el diseño, construcción y operación de los sistemas como se describe a continuación.

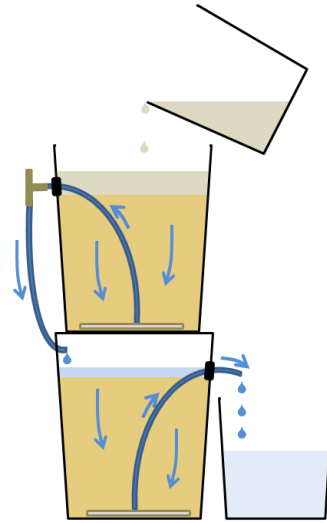
5.2.1. Diseño de los sistemas de filtros lentos de arena

El diseño de los filtros lentos de arena del presente trabajo de grado se fundamentó en el diseño realizado por el grupo de Global Engineering Program de la Universidad de Purdue, el cual consistió en el montaje de unidades como las que se muestran en la Figura 11.

Cada unidad de filtros lentos de arena estuvo conformada por dos baldes de plástico de cinco galones de capacidad (ver figura 17), con altura de 36.5 cm y diámetro de 30.5 cm como indican referencias comerciales en Colombia (Paraplásticos, 2014), montados uno sobre otro, y rellenos con el material filtrante (arena), sin embargo, se hicieron variaciones con respecto al sistema de recolección del agua, debido a que en este caso se utilizó grava y grava fina (como material de transición) como medio para permitir el recaudo de la misma. Además, el sistema de recolección de agua se basó en una manguera con agujeros rodeando el perímetro

del fondo de los baldes conectada a una manguera de salida hacia la parte superior del recipiente.

Figura 11. Montaje de las unidades de filtros lentos de arena a escala de laboratorio.



Fuente: (Jafvert, y otros, 2011).

Los sistemas de tratamiento constaron siempre de una unidad de filtración lenta de arena como la descrita anteriormente y, según fue el tipo de sistema, con una unidad de pretratamiento y/o postratamiento.

El sistema más complejo analizado estuvo conformado por un prefiltro de grava, una unidad de filtro lento de arena y un postratamiento con cloración, siendo el prefiltro de grava incorporado al filtro mientras que la cloración fue realizada aplicando la dosificación de hipoclorito de sodio al agua previamente filtrada y contenida en otro recipiente. Por otro lado, el sistema más simple consistía en hacer pasar el agua por una unidad de filtración lenta de arena sin pretratamientos o postratamientos.

5.2.1.1. Parámetros y Variables de diseño

Se establecieron los parámetros de operación que se usaron en el estudio, los cuales permanecieron invariables a lo largo del desarrollo del proyecto, tales como la carga hidráulica, profundidad de la lámina de agua encima del lecho filtrante, espesor de las capas de material granular que conformarán el filtro, sistema de entrada y salida del agua en el filtro y capacidad de los filtros, cuyos valores están presentados en la Tabla 4.

Con base en los parámetros fijados, se estudió la eficiencia de remoción de color, turbidez y coliformes fecales, y la variación del pH a cada tipo de agua tratada, haciendo variar el tren de tratamientos, tomando como variables independientes la presencia y ausencia de la prefiltración y cloración en el tren.

Tabla 4. Parámetros que intervienen en la investigación.

Parámetro	Valor	Unidad
Espesor de la capa de grava	3.81	cm
Espesor de la capa de grava fina (material de transición)	2.54	cm
Espesor de la capa de arena (lecho filtrante)	19.0	cm
Capacidad del filtro	30	L/día
Carga hidráulica	30.35	cm

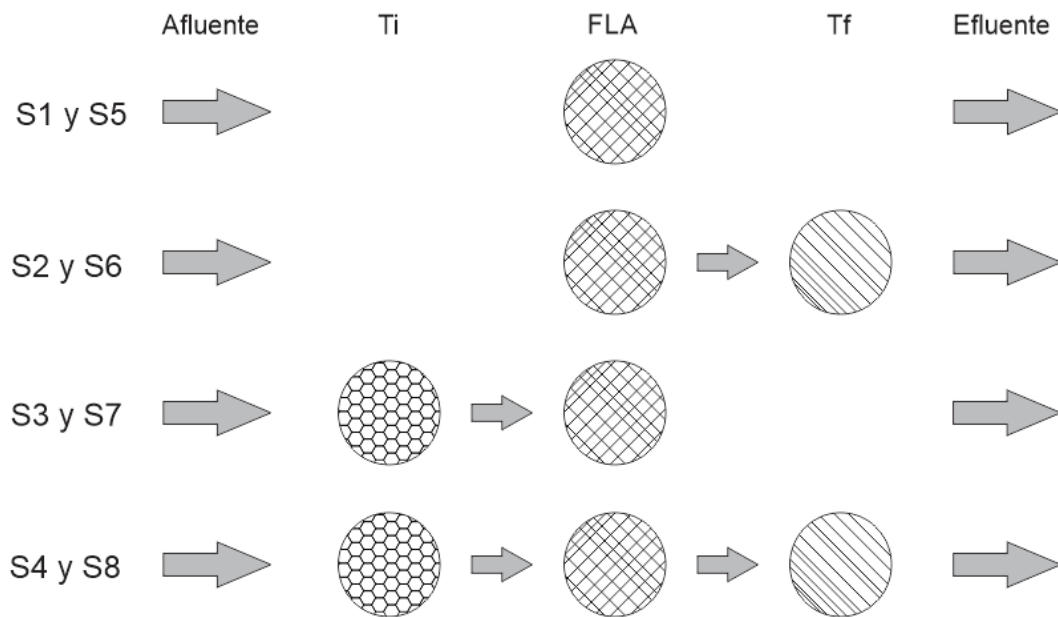
5.2.2. Diseño de experimento

Durante la implementación de los filtros lentos de arena se siguió lo establecido en la Tabla 5, (Véase Figura 11), en la que se muestran los diferentes sistemas de tratamiento implementados, conformados por un pretratamiento (Ti), un filtro lento de arena (FLA) y un postratamiento (Tf); se estudiaron y aplicaron los mismos sistemas para cada tipo de agua tratar, es decir, al agua proveniente del embalse de Arroyo Grande y al agua proveniente de los pozos profundos, para un volumen de 5 L diarios por sistema como volumen mínimo a usar como plantea el grupo GEP (Jafvert, y otros, 2011).

Tabla 5. Diseño de experimento de la investigación.

Tipo de agua	Sistema	Pre-tratamiento	Filtro lento de arena (FLA)	Post-tratamiento
Agua del Embalse	S1		X	
	S2		X	X
	S3	X	X	
	S4	X	X	X
Agua de Pozos	S5		X	
	S6		X	X
	S7	X	X	
	S8	X	X	X

Figura 12. Esquema del proceso de los sistemas de tratamiento para cada tipo de agua.



Cabe mencionar que teóricamente se evaluaron cuatro sistemas de tratamiento de filtración lenta en arena para cada tipo de agua a tratar (Ver Figura 12), sin embargo, para efectos prácticos, sólo fueron construidos dos filtros de arena para cada tipo de agua, puesto que el

proceso de postratamiento fue evaluado de forma independiente una vez el agua era tratada en las etapas anteriores del tratamiento.

5.2.3. Construcción de los sistemas de tratamiento

A continuación se describe el proceso de construcción de los filtros lentos de arena y prefiltros de grava a escala de laboratorio, junto con el procedimiento seguido para la cloración.

5.2.3.1. Filtros lentos de arena

El material de relleno de los filtros, es decir, la grava y la arena, fue obtenido en el municipio de María la Baja, proveniente del arroyo de Matuya que se encuentra aproximadamente a 10.00 km del corregimiento de Playón, y corresponde a uno de los arroyos más importantes que bañan al municipio. Según el diseño propuesto por GEP, el tamaño de las partículas de arena que conforman el lecho filtrante deben estar aproximadamente entre 0.35 mm y 1.6 mm, por lo que sólo se usó el material que se pasó por el tamiz No. 12 (1.68 mm) y se retuvo en el tamiz No. 50 (0.297 mm), los cuales corresponden a los tamices más cercanos al tamaño establecido en el diseño, disponibles en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Cartagena.

Con este tamizado se calculó el porcentaje de material útil para el lecho filtrante, comparando el material en estado natural extraído del arroyo con el material a usar luego del secado y tamizado, como se presenta en la Tabla 6, donde se tomó una muestra de la arena y se determinó el peso del material retenido en el tamiz No. 12 y que pasó por el tamiz No. 50, lo cual constituye al material que no puede ser usado.

Tabla 6. Determinación del porcentaje de pérdida del material

Peso del recipiente	190.5 g
Peso del recipiente + material en estado natural	1165.5 g
Peso del recipiente + muestra seca lavada por el tamiz No. 200	1066.8 g
Peso del recipiente + material retenido en el tamiz No. 12	248.6 g
Peso del recipiente + material que pasa el tamiz No. 50	362.5 g
Material útil	646.2 g

Con lo anterior se tiene que el porcentaje de pérdida es del 33.72 % (Ver ecuación 5.1), es decir, que por cada metro cúbico comprado de arena, se usó para el lecho filtrante solo 0.66 m³ de arena.

$$\% \text{ de Pérdida} = \frac{\text{Material en estado natural (g)} - \text{Material útil (g)}}{\text{Material en estado natural (g)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$\% \text{ de Pérdida} = \frac{(1165.5 \text{ g} - 190.5 \text{ g}) - 646.2 \text{ g}}{(1165.5 \text{ g} - 190.5 \text{ g})} \times 100 = 33.72\%$$

Sin embargo, parte del material desechado para el lecho filtrante se usó como material en la capa de transición entre la grava y la arena, para lo cual se usó el material que se retuvo en el tamiz No. 12, lo cual indica que para el material de transición se usó gravilla con tamaño mayor a 1.68 mm. En la Figura 13, se muestra el material de transición (A), el material útil después de tamizado (B), el material fino que pasó por el tamiz No. 50 (C) y el material que pasó por el tamiz No. 12 pero aún contiene el material fino (D).

Figura 13. Materiales obtenidos con el tamizado de la arena



La capa de grava o capa base del filtro estuvo conformada por canto rodado extraído del arroyo Matuya, la cual tenía un tamaño máximo de 40 mm.

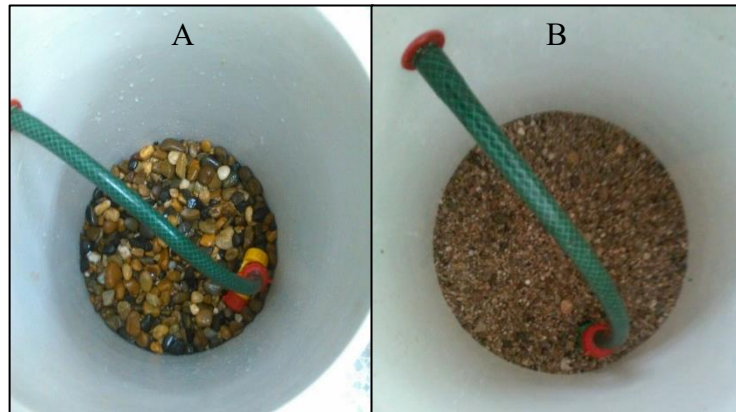
Antes de colocar el material de relleno, se colocó el sistema de drenaje y recolección del agua al interior del filtro (ver Figura 14), usando dos segmentos de manguera de ½” de diámetro externo, uno de 72 cm de longitud para la recolección del agua en la base del filtro y otro de 33 cm para transportar el agua desde la base hasta la salida en la parte superior, el segmento en la base se perforó cada 7.5 cm para permitir el ingreso del agua filtrada.

Figura 14. Balde, mangueras y accesorios usados en la construcción de los filtros a escala de laboratorio.



Para el relleno de cada uno de los baldes de 5 galones, siguiendo con las recomendaciones del diseño propuesto por GEP, se colocó la capa base de grava con un espesor de 3.81 cm (1.5 in), la capa de transición de 2.54 cm (1 in) y el lecho filtrante de arena con 19 cm de espesor. Así pues, después de haber sido acomodado el sistema de drenaje, el material granular, conformado por canto rodado adquirido en el municipio de María La Baja, fue dispuesto en el fondo de los baldes, húmedo, luego de ser lavado, como se presenta en la Figura 15 (A); y sobre este se dispuso el material de transición, el cual consistió en grava fina previamente lavada y libre de materia orgánica, Figura 15 (B).

Figura 15. Disposición de la capa de grava (A) y material de transición (B) en los filtros



Luego se procedió a la colocación de la arena encima del material de transición, ésta se dispuso húmeda, al igual que las dos capas anteriores y se relleno el balde hasta lograr el espesor de 19.0 cm de lecho filtrante, como se muestra en la Figura 16. La superficie de la arena alcanzaba un nivel de 5.0 cm por debajo del punto de salida de agua de los filtros, esto con el fin de mantener un nivel de agua de 5.0 cm por encima de la arena durante el periodo de operación de los sistemas de tratamiento.

Figura 16. Colocación de la capa de arena en los filtros a escala de laboratorio.



Con lo anterior, se obtuvo como producto los filtros lentos de arena, compuestos cada uno por dos baldes de 5 gal, ambos con el mismo material de relleno y sistema de drenaje, ubicados de tal forma que el agua filtrada del primer balde pase por el segundo balde, duplicando así el espesor del lecho filtrante, como se observa en la Figura 17.

Figura 17. Unidad de filtro lento de arena



5.2.3.2. Pretratamiento

La filtración preliminar rápida “gruesa” (prefiltración) como pretratamiento a los filtros lentos de arena que consistió en un balde plástico de 5 gal, el cual se relleno con una capa de 17 cm de espesor de grava, similar al material usado en la capa base del filtro lento de arena, es decir, canto rodado extraído del arroyo Matuya. Este se caracteriza por ser de flujo descendente, el agua entra por la parte superior del balde y sale por un orificio en el fondo de este, el cual está conectado a una manguera que conduce el efluente del prefiltro hasta el filtro lento de arena, que está inmediatamente debajo, como se muestra en la Figura 18, está manguera tiene orificios pequeños distribuidos uniformemente para repartir el agua en toda la superficie del lecho filtrante de arena, sin alterar la capa biológica superior.

Figura 18. Filtro de grava como pretratamiento



5.2.3.3. Cloración

La cloración del agua filtrada se desarrolló como postratamiento a los filtros lentos de arena, usando una sustancia de hipoclorito de sodio (NaOCl) al 13 %, es decir, que por cada 100 mL de la sustancia hay 13.0 g de NaOCl . Según el RAS 2012, esta es una sustancia de fácil manejo, no es tóxica a menos que sea ingerido, de fácil transporte, no requiere de equipos sofisticados para su aplicación, pero tiene la desventaja de tener poca estabilidad, tiene una baja concentración de cloro activo, generalmente entre 2.5 y 15% (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2012).

Para conocer la cantidad de sustancia que se debe usar para la desinfección, primero es necesario conocer la concentración de cloro (Cl_2) en la sustancia, teniendo en cuenta que el peso molecular del Cl_2 es de 70.91 g/mol y del NaOCl es de 74.44 g/mol, además se puede decir que por su peso molecular casi igual, un equivalente de mol de Cl_2 es igual a un equivalente de mol de NaOCl, como se muestra en la ecuación 5.2.

$$\frac{1 \text{ mol } Cl_2}{1 \text{ mol NaOCl}} = \frac{70.91 \text{ g}}{74.44 \text{ g}} = 0.95 \approx 1 \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Así pues, aceptando esta equivalencia, se calculó la concentración de cloro en la sustancia, como se muestra en la ecuación 5.3.

$$\left(\frac{13.0 \text{ g NaOCl}}{100 \text{ mL}}\right) \left(\frac{1 \text{ mol NaOCl}}{74.44 \text{ g NaOCl}}\right) \left(\frac{1 \text{ mol } Cl_2}{1 \text{ mol NaOCl}}\right) \left(\frac{70.91 \text{ g } Cl_2}{1 \text{ mol } Cl_2}\right) = \frac{123.8 \text{ g } Cl_2}{L} \quad (\text{Ec 5.3})$$

La dosis de cloro que debe aplicarse debe ser suficiente para satisfacer su demanda y dejar un residual óptimo de cloro, se recomienda una dosificación de 3.0 mg de Cl_2 por litro de agua a tratar, por lo tanto, se debe diluir la solución de 123 800 mg Cl_2 /L a 3.0 mg Cl_2 /L, para lo cual solo se aplica una regla de tres simples (Ver Ec. 5.4), donde se tiene que en un litro de solución se tienen 123 800 mg de Cl_2 , entonces en cuantos litros de solución se tendrá una concentración de 3 mg de Cl_2 .

$$3 \text{ mg } Cl_2 \times \frac{1000 \text{ mL de solución}}{123 \ 800 \text{ mg } Cl_2} = 0.0242 \text{ mL de solución} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

De esta forma, para que un litro de agua tratada tenga una concentración de 3 mg de Cl_2 , se le debe agregar 0.0242 mL de la solución de hipoclorito de sodio al 13%.

Para un rápido cálculo de la dosificación de la solución de hipoclorito de sodio en el agua a desinfectar, se tiene una ecuación básica que resume el anterior procedimiento, ver ecuación 5.5.

$$\text{Volúmen de solución a añadir (mL)} = \frac{[\text{Volumen de agua a clorar (L)}] \times 0.315}{\% \text{ de NaOCl en la solución}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Remplazando los valores en la ecuación 5.5 se obtiene lo siguiente

$$\text{Volúmen de solución a añadir (mL)} = \frac{1 \text{ L} \times 0.315}{13} = 0.0242 \text{ mL}$$

Con lo cual se obtiene el mismo resultado presentado anteriormente.

Para la cloración, luego de hacer pasar el agua por el filtro lento de arena, se tomaron 2 L de agua filtrada y se le agregaron 0.0484 mL de la solución de hipoclorito al 13%, lo cual equivale aproximadamente a dos gotas del gotero usado en el laboratorio, como se muestra en la Figura 19, posteriormente se dejó reposar el agua durante 30 minutos para medir el cloro residual.

Figura 19. Cloración del agua filtrada



5.2.4. Operación de los sistemas de tratamiento

Para la puesta en marcha de los filtros lentos de arena se transportó el agua objeto de estudio desde el municipio de San José de Playón hasta el campus de Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena. Dado que se suministraría 5.0 L de agua a cada sistema durante 21 días fue necesario transportar 210.0 L de agua de cada tipo, la cual se tomó de los pozos y el embalse el día 07 de julio de 2016 (ver Figura 20), garantizando de esta forma que la muestra del afluente fuera la misma durante el periodo de estudio.

Figura 20. Recolección de las muestras de agua del embalse y los pozos profundos en San José de Playón



Teniendo el agua almacenada, se inició la operación de los sistemas con los filtros el día 09 de julio, continuando su operación durante las siguientes tres semanas, como plantea la investigación de Aguiar y Potela (2009), para que se desarrolle la capa biológica “schmutzdecke” en la parte superior del estrato de arena, el cual corresponde al periodo de maduración del filtro.

Durante este periodo de tres semanas, diariamente se echaban 5.0 L de agua a cada sistema, teniendo en cuenta los que funcionaban para agua del embalse y los de agua de pozos profundos, además se realizó un monitoreo del tiempo de retención, volumen de entrada y salida, velocidad de filtración y la formación de la capa biológica.

5.2.5. Análisis y comparación de las características del agua en cada sistema de tratamiento

Se realizó el análisis y la comparación de las características del agua en cada uno de los sistemas de tratamiento de filtración lenta de arena con base en la medición de los parámetros fisicoquímicos como pH, color y turbidez, y microbiológicos como coliformes fecales, los cuales fueron comparados con los valores máximos establecidos para cada uno de ellos por las regulaciones en materia de agua potable en Colombia (Resolución 2115 de 2007).

Los resultados obtenidos se organizaron en tablas y gráficos, permitiendo observar claramente las diferencias entre los parámetros determinados en la investigación y la normatividad vigente y se analizaron mediante el método estadístico descriptivo con muestras no probabilísticas (Hernández Meléndrez , 2006).

Para las muestras provenientes de los pozos profundos y del embalse fueron llevados a cabo los mismos procesos de tratamiento con filtración lenta de arena y se realizaron los mismos ensayos.

Simultáneamente con los diferentes sistemas de tratamiento seleccionados, se comparó el funcionamiento éstos y un filtro proporcionado por la Corporación de Desarrollo Solidario de Bolívar (CDS), el cual consiste en una membrana porosa con microtubos en forma de “U” a través de los cuales circula el agua pero que son tan pequeños que ninguna bacteria, protozoo o quiste puede atravesarlos (Sawyer International, 2016).

5.2.5.1. Toma de muestras en cada etapa del sistema

Consistió en la toma de muestras del efluente de los sistemas de tratamiento de filtración lenta de arena implementados en el laboratorio, teniendo en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-1 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995) sobre el muestreo de agua en sistemas de tratamiento.

5.2.5.2. Realización de los ensayos de referencia

A cada una de las muestras recolectadas se les realizaron los ensayos de pH, turbidez, color y coliformes fecales, llevados a cabo en los laboratorios de CARDIQUE.

5.2.5.3. Comparación de los resultados con la Resolución 2115 de 2007

Esta subetapa consistió en el análisis de los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados en la sub etapa previa, comparándolos con los valores máximos correspondientes a los mismos parámetros establecidos en la Resolución 2115 de 2007, a partir de lo cual se hizo la evaluación de la filtración lenta de arena como sistema de tratamiento para los dos tipos de agua analizados.

5.2.5.4. Evaluación y comparación entre el funcionamiento del filtro Life Straw y los filtros lentos de arena implementados a escala de laboratorio

La Corporación de Desarrollo Solidario de Bolívar en conjunto con la ONG *Ayuda en acción*, entregaron un filtro LifeStraw® Community en la institución educativa de San José de Playón en el mes de julio del 2016, el cual es un purificador microbiológico de agua para uso en el lugar de consumo, destinado a ser usado diariamente en comunidades, escuelas e instituciones, que no utiliza químicos ni requiere de electricidad.

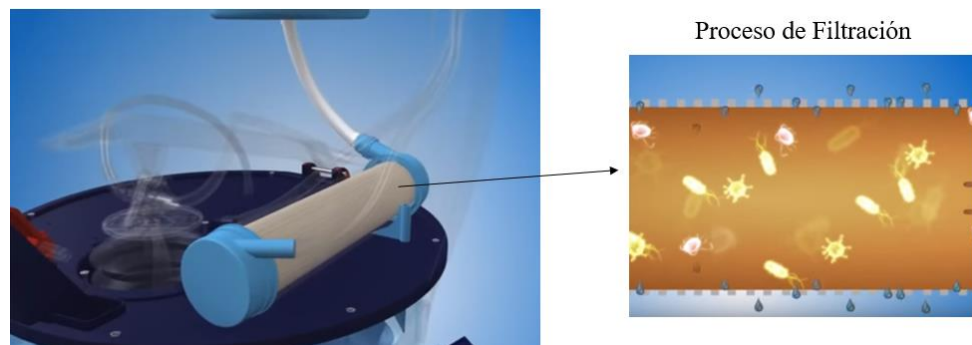
Este filtro está compuesto principalmente por una malla de prefiltro, un contenedor de agua sucia en la parte superior y uno del agua filtrada en la parte inferior llamado contenedor de almacenamiento seguro, una manija de contralavado y en la parte intermedia el contenedor encargado de la filtración, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Montaje del filtro LifeStraw Community



Para llevar a cabo el proceso de filtración, primero se hace pasar el agua sucia por la malla de prefiltro, la cual remueve partículas gruesas con tamaño superior a $80.00\ \mu\text{m}$, pasando al contenedor de agua sucia, de allí es conducida al cartucho de ultra filtración, en el cual las partículas con tamaño superior a $20.00\ \mu\text{m}$ son retenidas por una membrana y el agua filtrada pasa por los poros de esta, con lo cual se espera que se remuevan bacterias, virus y quistes de protozoarios (ver Figura 22), desde allí el agua filtrada se almacena en el contenedor de almacenamiento seguro. Por lo tanto, para la filtrar agua con este sistema solo se debe verter el agua en el prefiltro y esperar que el agua filtrada comience a salir en el contenedor inferior.

Figura 22. Proceso de filtración por membrana en el filtro LifeStraw Community



Modificado de: (Vestergaard, 2016).

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del efluente de los filtros implementados a escala de laboratorio y el filtro Life Straw, se realizó una comparación entre parámetros como pH, color, turbidez y coliformes fecales, con el fin de complementar la evaluación de la filtración lenta de arena bajo diferentes condiciones de operación.

5.3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA EN LA ESCUELA DE EDUCACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA DEL CORREGIMIENTO

La implementación de los dos filtros lentos de arena en la Institución Educativa Técnica y Agropecuaria de San José de Playón se llevó a cabo con el apoyo del grupo *Global Engineerig Program* (GEP) de la Universidad de Purdue, liderado por el Profesor Chad Jafvert, quien estuvo presente al momento de la implementación de los filtros en la institución, junto con tres de sus estudiantes en la primera semana del mes de agosto.

5.3.1. Obtención de los materiales para la construcción de los filtros

Previo a la llegada del grupo GEP de Purdue se compraron algunos materiales que serían necesarios para la construcción de los filtros, tales como dos tanques plásticos de 55 galones (208 L), seis baldes plásticos de 5 galones (19 L), una pala, malla fina para evitar la entrada de insectos al filtro, y arena para el lecho filtrante.

Al igual que los filtros construidos a escala de laboratorio, para estos se usó arena proveniente del arroyo de Matuya, por lo cual se asumió el mismo porcentaje de pérdida después del tamizado y lavado, es decir, del material comprado aproximadamente el 66.28 % podría ser usado para el lecho filtrante de arena. Se compraron tres metros cúbicos de esta arena en el corregimiento de María la Baja, y fueron transportados hasta la institución educativa en el corregimiento de San José de Playón en una volqueta, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Descargue de la arena en la Institución de San José de Playón



Los otros materiales necesarios para la construcción de los dos filtros fueron traídos de la Universidad de Purdue por el profesor Jafvert, tales como, mangueras, herramientas como destornillador y tornillos, tamiz rotatorio y el plato plástico poroso para la recolección del agua en el fondo del filtro.

5.3.2. Construcción de los filtros

La construcción de los dos filtros en el colegio se llevó a cabo en cuatro etapas durante la primera semana del mes de agosto, las cuales se explican a continuación:

- Secado de la arena: teniendo la arena en la institución, se extendió en el patio sobre un manto plástico para que se secase durante el día con el calor del sol, ya que para tamizar la arena era indispensable que estuviera seca.
- Tamizado de la arena: el tamaño de los granos de arena no debe estar por debajo de los 0.35 mm, ni superar los 1.6 mm, por lo que fue necesario tamizar la arena antes de usarla en el lecho filtrante, para lo cual el grupo GEP de Purdue ha diseñado un tromel o tamiz rotatorio de tambor con tamaños de abertura del tamiz de 0.35 mm y 1.6 mm, como se muestra en la Figura 24. Usando esto, primero se tamizó la arena para separar las partículas con tamaño superior a los 1.6 mm y luego se hizo pasar el material nuevamente por el tambor para eliminar los finos (menor a 0.35 mm).

Figura 24. Tamiz rotatorio de tambor diseñado por GEP usado en Playón



- Lavado de la arena: luego de tamizar la arena fue necesario lavarla para eliminar cualquier material orgánico o contaminante presente en esta.
- Armado de los filtros: para el armado de los filtros primero se perforó con un taladro el tanque en la parte superior, formando el orificio por el cual sale la manguera que conduce el agua desde el filtro hacia afuera. Posteriormente se colocó el plato plástico poroso en el fondo del tanque conectado a la manguera que salió por el orificio, como se observa en la Figura 25. Finalmente se relleno el tanque con la arena lavada hasta 5.0 cm por debajo del orificio.

Figura 25. Armado de los filtros en la institución de San José de Playón



Terminada la construcción de los dos filtros, el día 3 de agosto de 2016 inició la puesta marcha de los filtros, adicionando agua del embalse, sin embargo no se llevó a cabo el proceso de cloración hasta que terminó el periodo de maduración del filtro, disminuyendo la turbidez del agua. Sobre los filtros se puso una malla fina para evitar el ingreso de mosquitos y otros insectos y animales (Ver Figura 26).

Figura 26. Filtros implementados en la Institución educativa de San José de Playón



5.3.3. Análisis del agua filtrada

Luego del proceso de filtración y desinfección, se tomaron muestras del agua tratada, teniendo en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-1 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995) sobre el muestreo de agua en sistemas de tratamiento.

A cada una de las muestras recolectadas se realizaron ensayos de pH, turbidez, color y coliformes fecales, que se llevaron a cabo en los laboratorios de CARDIQUE, los cuales se

compararon posteriormente con lo establecido en la resolución 2115 de 2007 sobre los parámetros de calidad de agua potable.

5.4. RECOMENDACIONES A LA COMUNIDAD DE PLAYÓN SOBRE LA INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS FILTROS

Con base en las características de los sistemas de filtración lenta de arena determinados con la implementación a escala de laboratorio y teniendo en cuenta las consideraciones generales que presentan Torres y Villanueva (2014), y a la asesoría del Profesor Chad Jafvert y su grupo, se capacitó a algunos líderes de la comunidad de San José de Playón y estudiantes de la institución educativa para que fueran capaces de construir y mantener su propio sistema de filtración lenta en arena a escala domiciliaria.

Adicionalmente se dieron indicaciones sobre la escogencia de los materiales adecuados para la construcción de los filtros y el mantenimiento que debe brindárseles.

Para lo anterior, se elaboró un manual técnico de construcción, operación y mantenimiento de los filtros lentos de arena, que fueron suministrados a profesores y estudiantes de la Institución educativa técnica y agropecuaria de San José de Playón.

5.5. SOCIALIZACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA APTA PARA EL CONSUMO Y DEL USO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA

Para que la comunidad en la cual se enfoca la investigación pudiera aprovechar al máximo los beneficios del sistema de filtración lento de arena se realizó una campaña de socialización en la institución educativa de San José de Playón para promover nuevos conocimientos en materia de saneamiento, calidad del agua y el uso y funcionamiento de los filtros lentos de arena como método para purificar el agua.

Figura 27. Charlas de socialización hacia la comunidad educativa y los líderes de la comunidad en San José de Playón



Esta campaña se llevó a cabo al finalizar la construcción de los filtros junto con el grupo de GEP y el profesor Jafvert, y fue dirigida a la comunidad de San José de Playón y a los líderes de la Institución Educativa, quienes quedaron a cargo del funcionamiento de los filtros en la escuela, como se muestra en la Figura 27.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante las cinco fases de la investigación, iniciando con la fase 1 que corresponde al diagnóstico de la situación problema y la determinación de pretratamientos y postratamientos adicionales a los filtros lentos de arena a utilizar en los sistemas, siguiendo con la fase 2, es decir, la implementación a escala de laboratorio de dichos sistemas y el análisis de las muestras tratadas. Posteriormente, se implementaron dos filtros lentos de arena en la escuela de la comunidad de San José de Playón con el apoyo de la Universidad de Purdue, la Universidad de Cartagena y la comunidad, la cual corresponde a la fase 3. Adicionalmente, durante la fase 4 se hicieron las recomendaciones para la instalación, operación y mantenimiento de los filtros. Teniendo todos los resultados y análisis del agua tratada se desarrolló la última fase que consistió en la socialización sobre la calidad del agua apta para el consumo y el uso y funcionamiento de los filtros lentos de arena.

6.1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA DE CALIDAD DE AGUA EN SAN JOSÉ DE PLAYÓN

De acuerdo con el POT del municipio de María La Baja, el corregimiento de San José de Playón cuenta con un acueducto que funciona en una barcaza ubicada en el embalse de Arroyo Grande. Sin embargo, este acueducto no posee planta de tratamiento ni brinda un servicio continuo debido a que las redes son insuficientes para el cubrimiento del corregimiento, además su cobertura es del 50% (Alcaldía de María La Baja, 2001).

Cabe destacar que San José de Playón no es el único corregimiento de María La Baja en el que se presenta esta situación, de hecho, el 82% de las comunidades rurales como San José de Playón nunca han contado con el suministro de agua potable en dicho municipio (Alcaldía de María La Baja, 2001). Además, en un contexto regional, la falta de agua potable es un factor común en muchas comunidades rurales (Caro, Aguirre, Vallejo, & Quiroga, 2015).

6.1.1. Descripción de las fuentes de agua de las que se abastece el corregimiento

Se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica y microbiológica de las distintas fuentes de abastecimiento del corregimiento, en las Tablas 7 y 8 se presentan algunos parámetros de las muestras de agua tomadas de uno de los pozos profundos ubicados en el corregimiento y del embalse Arroyo Grande respectivamente, entre los cuales se encuentran la turbidez, color aparente, pH, alcalinidad, cloruros, conductividad, dureza total, hierro total y coliformes fecales, junto con los valores máximos aceptados por la normatividad Colombiana que regula la calidad del agua para consumo humano, con la Resolución 2115 de 2007.

6.1.1.1. Pozos Profundos (Agua Subterránea)

San José de Playón se encuentra dentro de la zona de influencia de la cuenca hidrogeológica Sinú – San Jacinto la cual abarca los extremos noroccidentales de los departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre, Bolívar y Magdalena, y posee un área de 38.319 km² (Vargas, 2001). A esta cuenca pertenecen siete sistemas de acuíferos y como se aprecia en el Anexo C, Playón está influenciado por los sistemas acuíferos de Morrosquillo, Sincelejo – Morroa y Turbaco (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2013).

Figura 28. Pozo profundo de uso público en San José de Playón, cuenca hidrogeológica Sinú-San Jacinto.



En el corregimiento hay disponibles pozos profundos para la extracción de agua subterránea de forma artesanal, actualmente uno de ellos se encuentra en funcionamiento y es de uso público (ver Figura 28). Sin embargo, en uno de los hogares manifestaron que, para mayor

comodidad, decidieron construir su propio pozo profundo y utilizaron una bomba para la extracción del agua.

De acuerdo con los estudios realizados sobre el agua subterránea extraída de uno de los pozos profundos más usados por la comunidad dentro del corregimiento, como se presenta en la tabla 7, se tiene que los parámetros físicos analizados como turbidez, pH y color aparente cumplen con lo establecido en la resolución 2115 (Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Además, la concentración de cloruros y sulfatos están muy por debajo de los 250 mg/L que corresponde al límite máximo permisible para ambos parámetros en la normativa colombiana mencionada, a concentraciones que superen este límite se le confiere un sabor salado al agua y a las bebidas, e incluso la alta presencia de sulfatos podría tener un efecto laxante en los consumidores no habituados (Organización Mundial de la Salud, 2006). Con lo anterior, se demuestra que esta agua tiene buena apariencia, color y sabor, por lo que ha tenido gran aceptabilidad en la comunidad, pero es importante tener en cuenta que la calidad del agua no solo depende de su apariencia o de los parámetros que se pueden detectar con los sentidos.

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua de pozo profundo en Playón (Abril 2016)

Parámetros	Unidades	Pozos	Límite Permissible (Res. 2115 de 2007)	Cumple (Si/No)
Turbidez	UNT	0.92	2	Si
Color aparente	UPC	6	15	Si
pH	Unidades	7.16	6.5 a 9	Si
Alcalinidad	mg/L	110.00	200	Si
Cloruros	mg/L	15.81	250	Si
Conductividad	µS/cm	316.00	1000	Si
Dureza total	mgCaCO ₃ /L	153.00	300	Si
Sulfato	mg/L	77.10	250	Si
SST	mg/L	6.00	-	No
Hierro Total	mg/L	< LD*	0.3	Si
Manganeso Total	mg/L	0.362	0.1	No
Coliformes fecales	NMP/100mL	2	Ausencia	No
	UFC/100mL	11	0	No

*Menor que el límite detectable

Parámetros como la alcalinidad, que hace referencia a la concentración de carbonato y bicarbonato, y la dureza, que corresponde a la concentración de calcio, catalogados según la resolución 2115 como características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud, no constituyen un problema en el agua subterránea extraída de los pozos profundos, ya que estos están dentro de los máximos aceptados por la normatividad Colombiana, como se presenta en la Tabla 7.

La concentración de manganeso total fue de 0.362 mg/L, superando el límite permisible establecido por la norma, según la OMS (2006) la presencia de manganeso a concentraciones mayores que 0.1 mg/L produce un sabor no deseable en bebidas y mancha la ropa lavada y los aparatos sanitarios, además puede dar lugar a la acumulación de depósitos o precipitados negros en el sistema de distribución. Además, se recomienda que el agua a ser tratada mediante filtros lentos de arena tenga concentraciones de hierro y manganeso inferiores a 0.3 y 0.05 mg/L respectivamente con el fin de lograr un óptimo funcionamiento de los mismos (Gottinger, Mc Martin, Price, & Hanson, 2011).

Como indicador de la contaminación fecal en el agua, se midieron los coliformes fecales presentes en 100 mL de muestra, obteniendo 2 NMP/100 mL, lo cual indica que a pesar de no ser muy alta la presencia de coliformes si hay contaminación bacteriana en estas, ya que la norma establece que debe haber ausencia de estos.

6.1.1.2. Embalse

El embalse de Arroyo Grande (ver Figura 29) fue construido a finales de la década 1960, junto con el distrito de riego de María La Baja, con el fin de lograr un represamiento y aprovechamiento del agua proveniente de las escorrentías que vienen de las serranías de los Montes de María y de las corrientes del Arroyo Grande, posee 0.2 km² en espejo de agua y un área de cuenca de 184.66 km² (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres del Municipio de María La Baja, 2013).

Figura 29. Embalse de Arroyo Grande.



Según los análisis fisicoquímico y microbiológico efectuados a las muestras de agua provenientes del embalse de Arroyo Grande, como se presenta en la tabla 8, se observó que ésta presenta valores superiores a los establecidos en la resolución 2115 de 2007 en parámetros como la turbidez, color aparente y coliformes fecales.

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua del embalse en Playón (Abril 2016)

Parámetros	Unidades	Embalse	Limite Permissible (Res. 2115 de 2007)	Cumple (Si/No)
Turbidez	UNT	16.63	2	No
Color aparente	UPC	195.00	15	No
pH	Unidades	7.61	6.5 a 9	No
Alcalinidad	mg/L	2.33	200	Si
Cloruros	mg/L	<LD*	250	Si
Conductividad	µS/cm	250.00	1000	Si
Dureza total	mgCaCO ₃ /L	143.00	300	Si
Sulfato	mg/L	2.65	250	Si
SST	mg/L	10.00	-	No
Hierro Total	mg/L	<LD*	0.3	Si
Manganeso Total	mg/L	0.015	0.1	Si
Coliformes fecales	NMP/100mL	20	Ausencia	No
	UFC/100mL	3 100	0	No

*Menor que el límite detectable

La turbidez obtenida en el análisis fue de 16.63 UNT, siendo 2.00 UNT el límite máximo permitido por la resolución 2115, esto indica una alta concentración de partículas en suspensión, que para el agua del embalse fue de 10.00 mg/L. Además, los niveles altos de turbidez (>5 UNT) pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro (Marco, Azario, Metzler, & García, 2004).

El color aparente máximo permisible es de 15 UPC y el determinado en el agua del embalse fue de 195 UPC, indicando que el agua del embalse contiene grandes cantidades de sustancias disueltas y/o en suspensión, probablemente en su mayoría materia orgánica e iones metálicos.

En cuanto al aspecto microbiológico, se obtuvo un valor de 20 NMP/100 mL de coliformes fecales, mientras que en la resolución 2115 se establece que debe ser cero, por lo que se hace necesario realizar un tratamiento para la desinfección del agua.

Por otra parte, parámetros como el pH, la alcalinidad, cloruros, conductividad, dureza total, sulfatos, hierro total y manganeso total se encontraron por debajo de los límites máximos establecidos por la normativa, indicando así la baja presencia de metales en el agua.

6.1.1.3. Lluvia

En la Institución educativa, el agua lluvia es almacenada en temporadas invernales para su posterior consumo, por lo cual también constituye una fuente de abastecimiento, pero menos usada que los pozos profundos o el embalse, ya que depende del régimen de precipitaciones de la zona.

El corregimiento de San José de Playón se encuentra en el Piedemonte de los Montes de María y el plano de inundación del Canal del Dique, zona en la cual se presentan precipitaciones promedio entre 1000 y 2000 mm anuales. Según datos del IDEAM, se presentan dos periodos estacionales, el periodo invernal de mayo a noviembre, con lluvias moderadas en junio y julio, alcanzando la más alta precipitación en el mes de octubre, y el periodo de verano se presenta entre diciembre y marzo (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres del Municipio de María La Baja, 2013).

6.1.2. Diagnóstico desde el punto de vista social

De acuerdo con las entrevistas realizadas en nueve viviendas de la comunidad del corregimiento y en la Institución educativa de San José de Playón durante la primera visita de inspección para conocer su perspectiva acerca del problema de calidad del agua en la zona, se obtuvo que todos los habitantes entrevistados coincidieron en la información que se resume en la Tabla 9.

Tabla 9. Información obtenida con la entrevista realizada a la comunidad.

Preguntas de la entrevista	Entrevistado	Respuesta
¿Utiliza el agua que llega a su casa para el consumo?	Comunidad en general	No, ese agua es usada principalmente para aseo personal y doméstico
¿El servicio de agua es continuo?	Comunidad en general y comunidad educativa	No, durante algunas horas del día no llega el agua del embalse a las viviendas, pero coinciden en que en las zonas más bajas del corregimiento si es continuo.
¿Cuál es su fuente de consumo?	Comunidad en general	Agua subterránea de los pozos profundos.
¿Cuál es la fuente de consumo de los estudiantes?	Comunidad educativa	Agua lluvia recolectada de los techos en el colegio y agua del embalse
¿Tiene algún gasto por utilizar otra fuente?	Comunidad en general	Sí, el acarreo de una pimpina de 20 L desde un pozo profundo hasta las viviendas puede tener un costo de \$ 1 000
¿Se ha presentado escasez de agua alguna vez?	Comunidad en general	No, aunque a veces no llega el agua del embalse hasta las viviendas por la red de tuberías, siempre es posible ir hasta el embalse por agua.
¿Conoce o utiliza algún método para mejorar la calidad del agua?	Comunidad en general y comunidad educativa	No, el agua es consumida sin hacerle ningún tipo de tratamiento para su potabilización.
¿Siente que su calidad de vida o salud se ha visto afectada por el agua que usa?	Comunidad en general	El uso del agua del embalse para el aseo personal ha traído como consecuencia problemas en la piel de algunos habitantes, además problemas en las articulaciones por el acarreo del agua.
¿Conoce a alguien que se haya enfermado a causa del agua?	Comunidad en general	Sí, problemas en la piel y estomacales.
¿Existe alguna propuesta para mejorar la calidad del agua en la Institución?	Comunidad educativa	No, hasta el momento no se tiene ningún proyecto para eso.

6.1.2.1. Escuela

Con la visita y las entrevistas realizadas en la Institución Educativa Técnica y Agropecuaria de San José de Playón, se encontró que para consumo y otras actividades usan principalmente el agua proveniente del embalse, además usan agua lluvia, ya que gracias a una ONG suiza hace algunos años se construyó en la escuela un tanque de almacenamiento de aguas lluvias con su respectivo sistema de recolección del agua de los techos, para el consumo de los estudiantes, pero en temporadas secas no es utilizado. En la escuela, al igual que en el resto de la comunidad, no se realiza ningún tratamiento para potabilizar el agua.

6.1.2.2. Comunidad

Con las entrevistas realizadas (ver Tabla 8) se encontró que los habitantes no usan el agua del embalse para su ingesta ya que presenta características desagradables a los sentidos, sino que la usan principalmente para el aseo doméstico y personal, prefiriendo el agua subterránea, extraída de los pozos profundos, para el consumo, ya que manifiestan que esta es de mejor calidad, sin embargo para usarla, se debe extraer el agua de los pozos y transportarla hasta las viviendas, lo cual puede significar un gasto monetario o de esfuerzo físico, ya que el costo de acarreo de un tanque de capacidad 20 litros desde alguno de los pozos hasta las viviendas es de 1000 pesos, otra alternativa que no implica gasto económico es que las personas, especialmente mujeres y niños (ver Figura 30), transporten el agua hasta sus hogares, actividad que requiere gran esfuerzo físico, por lo que algunos habitantes manifestaron que han presentado molestias en sus articulaciones.

En temporadas secas, los habitantes se han visto afectados con escasez de agua en la red de tuberías, puesto que se le da mayor prioridad al riego de cultivos de palma con agua del embalse, sin embargo, el embalse por sí mismo y los distintos canales que cruzan por las cercanías del corregimiento han constituido una fuente importante de agua para los habitantes, ya que cuando el acueducto no se encuentra en funcionamiento, pueden transportar el agua en recipientes.

Figura 30. Transporte de agua en San José de Playón (2016)



Es importante destacar que, de los entrevistados, ninguno realiza tratamiento alguno al agua en sus casas previo a su consumo, y manifestaron que por usar el agua del embalse para el aseo personal algunos habitantes han presentado enfermedades en la piel.

6.2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO A ESCALA DE LABORATORIO

6.2.1. Operación de los sistemas

El inicio de operación se dio el día 9 de julio de 2016, finalizando el día 30 de julio, para una duración de operación de 21 días.

6.2.1.1. Capacidad

El diseño de GEP considera que una unidad de filtración conformada por baldes de 5 gal, tiene la capacidad tratar 10.00 L de agua cada ocho horas, es decir que, en un día es posible tratar un máximo de 30.00 L. Además, para garantizar la supervivencia de los microorganismos que habitan en la superficie de los granos de arena, es necesario no dejar de alimentar (aplicar agua) los sistemas por más de 48 horas y garantizar un tiempo mínimo de contacto con el agua de ocho horas.

No obstante, por efectos de transporte de agua desde las fuentes (embalse y pozos profundos) del corregimiento de San José de Playón, se realizó una aplicación diaria de 5.00 L a cada sistema de tratamiento durante tres semanas; por lo que fue necesario emplear 210.00 L de agua del embalse y 210.00 L de agua subterránea.

6.2.1.2. Tiempo de retención

Para la medición del tiempo de retención de los sistemas de tratamiento no se consideró el volumen diario 5.00 L, sino que se dividió en dos aplicaciones, una de 1500.00 mL y otra de 3500.00, la cual se tomó siempre como volumen de entrada para la facilitar la medición del tiempo de retención y controlar mejor el volumen de salida con los instrumentos disponibles en el laboratorio.

Durante el primer día de funcionamiento se midió el tiempo de retención de los sistemas de tratamiento; para un volumen de entrada de 3500.00 mL se obtuvieron distintos volúmenes de salida y tiempos, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Tiempo de retención de los sistemas de tratamiento en el primer día de funcionamiento.

Sistema	Volumen de entrada (mL)	Volumen de salida (mL)	Tiempo de retención (minutos)
S1	3500.00	3390.00	13.15
S3	3500.00	3360.00	17.77
S5	3500.00	3430.00	17.22
S7	3500.00	3460.00	24.17

La mayor diferencia entre volúmenes de entrada y salida se dio en el sistema S3, el cual está conformado por un prefiltro de grava y un filtro lento de arena para tratar agua proveniente del embalse, esta diferencia fue de 140.00 mL y se debe en gran medida a que las mangueras del sistema de recolección y salida de agua no quedan vacías en su totalidad en el paso del prefiltro al filtro.

Posteriormente, el día 23 de julio, cuando los filtros llevaban dos semanas en funcionamiento, se midió nuevamente el tiempo de retención en cada sistema y se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Tiempo de retención de los sistemas de tratamiento después de dos semanas de funcionamiento.

Sistema	Volumen de entrada (mL)	Volumen de salida (mL)	Tiempo de retención (minutos)
S1	3500.00	3457.00	44.49
S3	3500.00	3312.00	50.37
S5	3500.00	3437.00	35.15
S7	3500.00	3372.00	52.27

El tiempo de retención tuvo un aumento significativo durante las dos primeras semanas de funcionamiento, la razón principal de este aumento es el desarrollo de la capa biológica en la superficie de la arena y el crecimiento de microorganismos en la superficie de los granos de arena del lecho filtrante, ya que reducen el espacio por el cual el agua puede circular.

Al cabo de la tercera semana de funcionamiento de los sistemas de tratamiento el tiempo de retención obtenido se muestra en la Tabla 12, donde se aprecia que no hubo un aumento significativo con respecto a la medición de la semana dos en los sistemas S5 Y S7, los cuales funcionaron con agua de pozos profundos, este comportamiento se explica en que el crecimiento de los microorganismos en el lecho de arena empezó a decrecer y por lo tanto el *schmutzdecke* empezó a estabilizarse.

Tabla 12. Tiempo de retención de los sistemas de tratamiento después de tres semanas de funcionamiento.

Sistema	Volumen de entrada (mL)	Volumen de salida (mL)	Tiempo de retención (minutos)
S1	3500.00	3470.00	67.69
S3	3500.00	3450.00	45.34
S5	3500.00	3440.00	38.05
S7	3500.00	3425.00	59.71

Por otro lado, en el sistema S1 el tiempo de retención aumentó 23.20 minutos y en contraste, disminuyó 5.03 minutos para el sistema S3.

6.2.1.3. Capa biológica

Durante la primera semana de funcionamiento de los sistemas de tratamiento se observó la formación de una capa de color marrón sobre la arena y en las paredes de los baldes que conforman los filtros (ver Figura 31).

Figura 31. Etapa inicial de la capa biológica en los filtros lentos de arena a escala de laboratorio.



Al cabo del periodo de operación de los sistemas de tratamiento la capa superficial de los filtros lentos de arena lucía como muestra la Figura 32, en la que se aprecia un color marrón más oscuro, acompañado con un aumento en el tiempo de retención de los sistemas de tratamiento, lo cual indica que el espacio poroso entre los granos de arena se vio disminuido debido al crecimiento biológico de organismo como algas, plankton, protozoarios y bacterias propias del agua problema.

Figura 32. Capa superficial de los filtros durante su operación.



La capa biológica superficial se desarrolló más rápidamente en los sistemas de tratamiento que funcionaron con agua proveniente del embalse (sistemas S1 y S3), no obstante, al final del periodo de funcionamiento, para ambos tipos de agua, la capa biológica presentó el mismo aspecto, lo cual permitió un aumento del porcentaje de remoción de turbidez y coliformes fecales.

6.2.1.4. Velocidad media de flujo

Debido a que los filtros se construyeron con la capa superficial de arena 5.00 cm por debajo del agujero de salida del agua, la cabeza hidráulica del sistema es de 5.00 cm; este parámetro, el tamaño de los granos de arena y el grado de obstrucción de los mismos debido al material biológico, inciden en la velocidad de flujo, es por ello, que ésta presentó variaciones durante las mediciones realizadas (ver Tabla 13).

Tabla 13. Velocidad media de flujo de los sistemas de tratamiento.

Fecha de medición	Sistema	Velocidad media de flujo (m/h)
jul-09	S1	0.2259
	S3	0.1672
	S5	0.1725
	S7	0.1229
jul-23	S1	0.0668
	S3	0.0590
	S5	0.0845
	S7	0.0568
jul-30	S1	0.0439
	S3	0.0655
	S5	0.0781
	S7	0.0498

Según Huisman y Wood (1974), la velocidad de flujo óptima debe estar entre 0.10 y 0.20 m/h, y en la Tabla 13 se puede apreciar que durante la última semana de funcionamiento de los filtros, la velocidad de flujo estuvo por debajo de dicho rango, con lo que se constata que el crecimiento biológico fue el adecuado y favorable durante el periodo de operación, ya que ésta fue la única condición que presentó variaciones y que por tanto pudo haber disminuido la velocidad de flujo en los sistemas de tratamiento.

6.2.2. Análisis de las muestras filtradas

En los siguientes incisos se muestra los resultados de la implementación de sistemas de tratamiento a escala de laboratorio, mediante el análisis de parámetros como turbidez, color aparente, pH y cloro residual. Además, se estudió el funcionamiento de un filtro LifeStraw® Community, el cual fue proporcionado por la ONG Ayuda en acción y la CDS de Bolívar a la institución educativa de San José de Playón.

6.2.2.1. Muestras filtradas con cada uno de los sistemas con SSF a escala de laboratorio

En la Tabla 14 se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados por CARDIQUE a muestras tomadas de cada uno de los sistemas de tratamiento

implementados a escala de laboratorio, teniendo en cuenta que los sistemas estudiados se encuentran constituidos de la siguiente manera:

S1: Filtro lento de arena para agua del embalse.

S2: Filtro lento de arena para agua del embalse al que posteriormente se le realizó desinfección por cloración como postratamiento.

S3: Prefiltro de grava como pretratamiento y filtro lento de arena para agua del embalse.

S4: Prefiltro de grava como pretratamiento, filtro lento de arena para agua del embalse y desinfección por cloración como postratamiento.

S5: Filtro lento de arena para agua de los pozos.

S6: Filtro lento de arena para agua de pozo al que posteriormente se le realizó desinfección por cloración como postratamiento.

S7: Prefiltro de grava como pretratamiento y filtro lento de arena para agua de pozo.

S8: Prefiltro de grava como pretratamiento, filtro lento de arena para agua de pozo y desinfección por cloración como postratamiento.

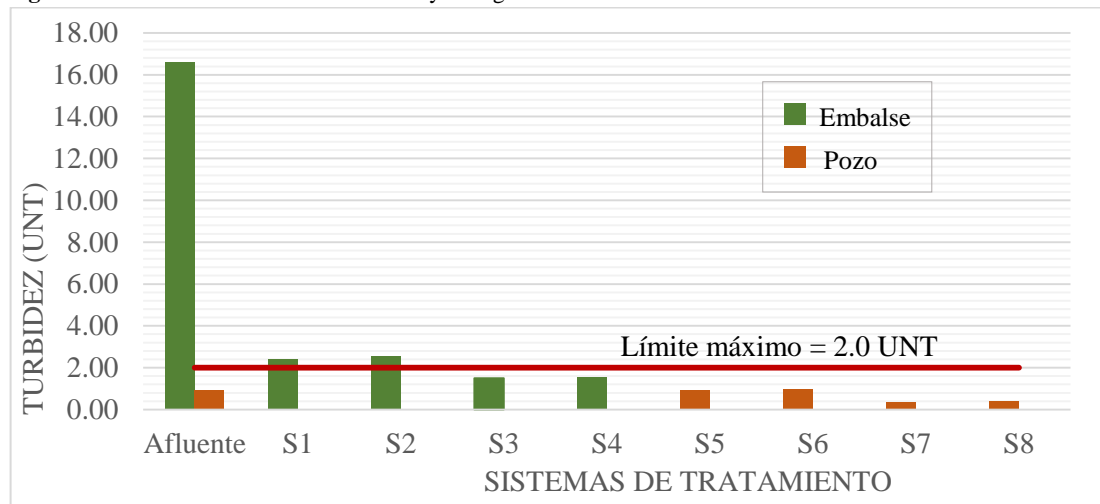
Tabla 14. Análisis de las muestras de agua tratadas con los sistemas implementados en el laboratorio.

Sistemas		Parámetros				
		Turbidez (UNT)	Color Aparente (UPC)	pH (Unidades)	Coliformes (UFC/100mL)	Cloro residual (mg/L)
Embalse	Afluente	16.63	195.00	7.61	3 100	-
	S1	2.41	58.00	7.88	0	-
	S2	2.56	51.00	7.92	0	0.60
	S3	1.50	22.00	7.69	11	-
	S4	1.56	22.00	7.79	0	0.60
Pozo	Afluente	0.92	6.00	7.16	11	-
	S5	0.91	25.00	7.67	0	-
	S6	0.98	26.00	7.89	0	0.60
	S7	0.35	19.00	7.87	0	-
	S8	0.40	27.00	8.05	0	0.50

▪ **Turbidez**

El valor máximo aceptable para la turbidez según la normatividad colombiana en la Resolución 2115 es de 2.00 UNT, por lo tanto como se muestra en la Figura 31 solo en los sistemas S1 y S2, donde se trató agua del embalse, se superó este valor, ya que la turbidez del afluente era muy alta y no se usó ningún tipo de tratamiento para remover el exceso de turbidez. Sin embargo, al tratar el agua del embalse con un prefiltro de grava que acompaña al filtro lento de arena se redujo la turbidez por debajo del límite, como se observa en la Figura 33 para los sistemas S3 y S4. Por otro lado, en los sistemas S5, S6, S7 y S8 no se presentó ningún inconveniente con la turbidez, ya que estos fueron usados para tratar el agua de pozos, la cual tenía una turbidez inicial por debajo del límite máximo, de 0.92 UNT, no obstante a pesar de tener una baja turbidez al tratar el agua esta disminuyó aún más.

Figura 33. Gráfico de turbidez del afluente y del agua tratada en cada sistema.



Teniendo en cuenta que los sistemas S1, S2, S3 y S4 operaron con agua del embalse, y los sistemas S5, S6, S7 y S8 con agua de pozos, el porcentaje de remoción de turbidez de cada uno se presenta en la Tabla 15, obteniendo el mayor porcentaje de remoción en los sistemas en que se usó prefiltro de grava como pretratamiento y filtro lento de arena para tratar el agua (S4 y S7), con valores de 90.98 % tomando el agua del embalse como afluente y de 61.96 % con el agua de pozo como afluente. En los sistemas operados con agua de pozo se obtuvieron porcentajes bajos de remoción de turbidez, en incluso en el sistema S6 luego del proceso de

desinfección con cloro la turbidez aumentó, superando el valor inicial del afluente, por lo que no hubo remoción de la turbidez. Es importante resaltar que tanto para los sistemas que operaron con agua de pozos como del embalse, aumentó la turbidez al desinfectar con cloro el agua tratada.

Tabla 15. Remoción de la turbidez en cada uno de los sistemas implementados.

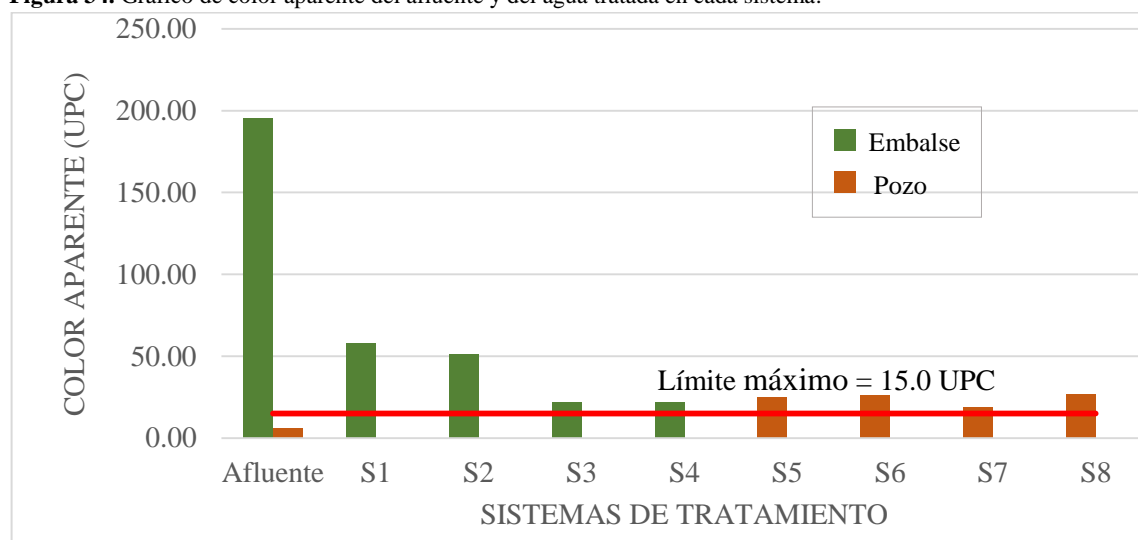
Sistemas	Porcentaje de remoción de la turbidez (%)
S1	85.51
S2	84.61
S3	90.98
S4	90.62
S5	1.09
S6	-
S7	61.96
S8	56.52

Usando los sistemas con filtros lentos de arena se obtuvo un porcentaje de remoción máximo de 90.98 %, muy similar al obtenido en la investigación de Torres y Villanueva (2014) de 96.40 %, quienes realizaron un monitoreo de filtros lentos de arena en el laboratorio previo a su instalación en una comunidad rural de Cundinamarca. Por otro lado, según publicaciones del *National Environmental Service Center* (2015) y Jafvert (2011) con los filtros lentos de arena se alcanza una turbidez por debajo de 1.0 UNT, sin embargo, en la presente investigación al usar con agua del embalse no se obtuvo una turbidez por debajo de ese valor.

▪ **Color Aparente**

Si bien es notable que el color aparente del agua del embalse disminuyó considerablemente en todos los sistemas de tratamiento, éste no alcanzó a ser menor que el límite máximo establecido en la resolución 2115 (15.00 UPC) en ninguno de ellos. Sin embargo, se alcanzó una disminución del 88.72% en los sistemas S3 y S4, situándose éste en 22.00 UPC (véase Figura 34).

Figura 34. Gráfico de color aparente del afluente y del agua tratada en cada sistema.



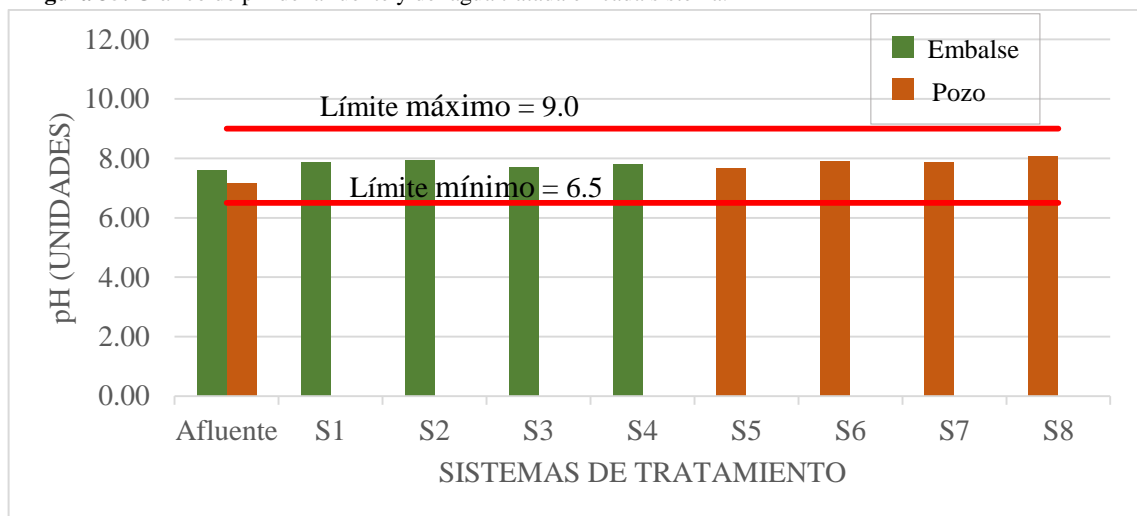
Por otro lado, en los sistemas que trataban agua proveniente de los pozos profundos, se observó un aumento en el color aparente, pasando de 6.00 UPC hasta 19.00 UPC, en el caso del sistema S7 y hasta 27.00 UPC en el sistema S8. Un comportamiento similar fue observado en filtros implementados a escala domiciliaria en la zona rural de Huila, donde en algunos casos el efluente de los filtros presentaba un aumento de color aparente hasta del 47.00 % en comparación con el afluente, y éste aún permanecía por encima de 15 UPC, evitando así que el agua tratada fuese apta para el consumo humano (Österdahl, 2015).

Este aumento en el color aparente del agua de pozos no es atribuible a la turbidez dado que éste parámetro disminuyó para el efluente de todos los sistemas de tratamiento, exceptuando el efluente del sistema S6 (ver Tabla 15). Este aumento de color puede ser atribuido a la presencia partículas inorgánicas en suspensión o disueltas procedentes del lecho filtrante que compone los filtros lentos de arena o a la presencia de metales como hierro y/o manganeso en la arena. Cabe destacar que el afluente de los sistemas que trataban agua de los pozos, presentó valores de manganeso por encima del límite establecido por la resolución 2115.

- **pH**

El pH de los efluentes de los sistemas de tratamiento se mantuvo siempre en el rango estipulado en la resolución 2115 de 2007, esto es, entre 6.50 y 9.00 unidades, variando entre valores de 7.67 y 8.05 unidades (ver Figura 35), es decir que, se mantuvo dentro de un rango neutro. Además, no se observó un aumento o disminución significativa con respecto a los afluentes.

Figura 35. Gráfico de pH del afluente y del agua tratada en cada sistema.



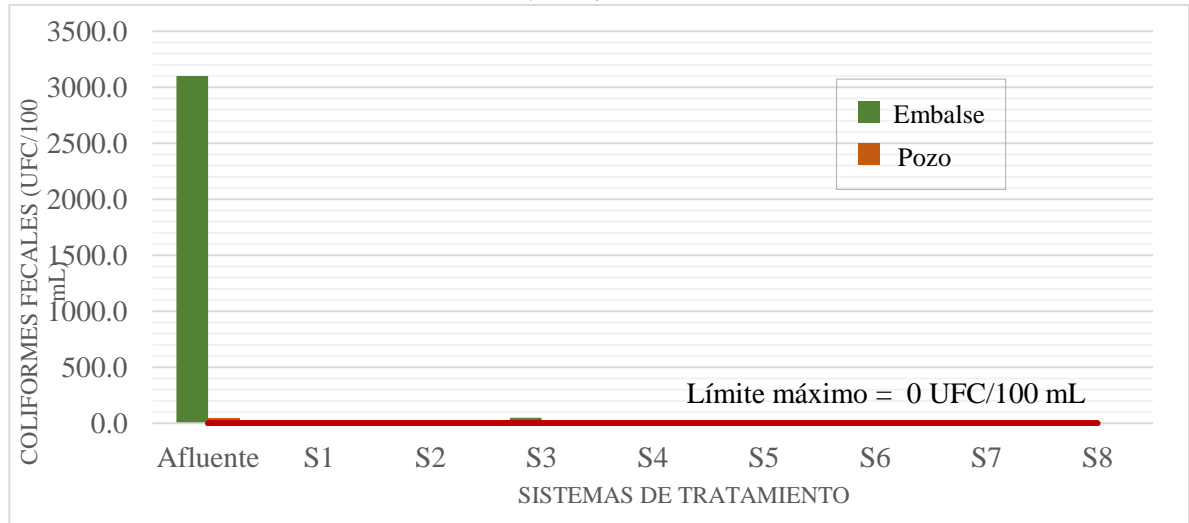
Por otra parte, el pH de los efluentes fue siempre mayor a 7.50 unidades, favoreciendo a la formación de ión hipoclorito en el momento de la cloración, en el caso de los sistemas con postratamiento, Es importante recalcar que el efecto desinfectante del cloro se ve disminuido debido a que el pH se mantuvo por encima de 7.50 unidades por lo que el ión hipoclorito predominaba por encima del ácido hipocloroso, y según el manual de tratamientos del agua de consumo humano de la Junta de Castilla y León (2009), el segundo es alrededor de 80 veces más eficaz que el ión hipoclorito.

- **Coliformes fecales**

Según la resolución 2115 de 2007, el agua apta para el consumo humano debe tener ausencia de coliformes, es decir, 0.00 UFC/100 mL, de esta forma solo el agua tratada con el sistema S3 superó el límite establecido, ya que tiene presencia de coliformes fecales de 11.00

UFC/100 mL, como se muestra en la Figura 36. Sin embargo, luego de clorar el agua tratada en el sistema S3, el cual corresponde al sistema S4, no se encontraron coliformes fecales en la muestra, comprobando así la eficiencia del postratamiento de desinfección.

Figura 36. Gráfico de coliformes fecales del afluente y del agua tratada en cada sistema.



Como se observa en la Tabla 16 para todos los sistemas se obtuvo un alto porcentaje de remoción de coliformes fecales, alcanzando el 100.00% de remoción en siete de los ocho sistemas analizados, e incluso en el sistema S3 en el cual se encontró presencia de coliformes en el agua tratada, se obtuvo un alto porcentaje, de 99.65 %.

Tabla 16. Remoción de coliformes fecales en cada uno de los sistemas implementados.

Sistemas	Porcentaje de remoción de coliformes fecales (%)
S1	100.00
S2	100.00
S3	99.65
S4	100.00
S5	100.00
S6	100.00
S7	100.00
S8	100.00

Con lo cual se puede concluir, que los filtros lentos de arena por ser filtros biológicos, funcionan muy bien para remover coliformes fecales de afluentes con alta o baja presencia de estos microorganismos, ya que hasta en los sistemas en que solo se usaron filtros lentos de arena para el tratamiento (S1 y S5) se obtuvo una remoción del 100.00%, similar a lo obtenido en investigaciones previas realizadas por Jafvert (2011) y, Torres y Villanueva (2014).

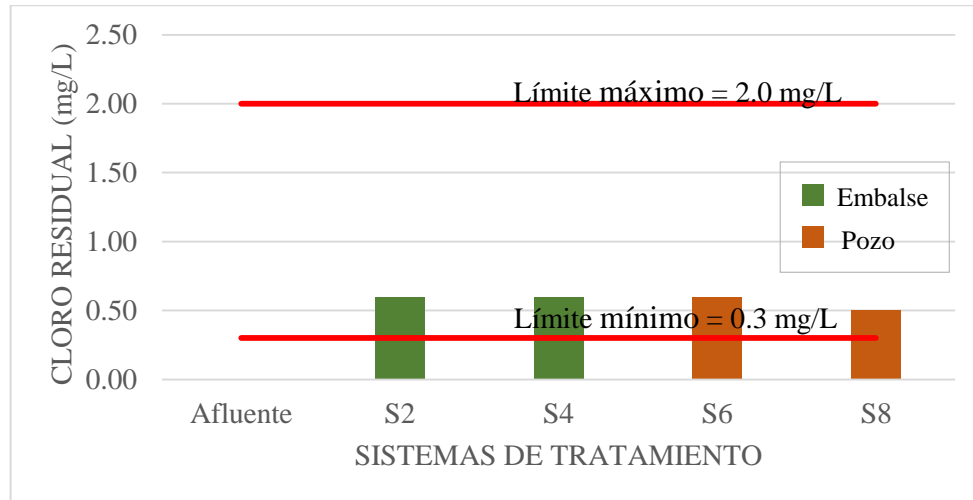
Sin embargo, para mayor seguridad se realizó la cloración en todos los sistemas, ya que esta proporciona una medida de prevención contra una futura contaminación que puede ocurrirle al agua bacteriológicamente segura.

- **Cloro residual**

En la resolución 2115 de 2007 se establece que el cloro residual libre del agua de consumo humano debe estar comprendido entre 0.30 y 2.00 mg/L, con el fin de destruir las bacterias por acción germicida y para la oxidación del hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno presentes en el agua, así como la destrucción de algunos compuestos que producen olores y sabores (Junta de Castilla y León, Consejería de Sanidad, 2009).

En la Figura 37 se puede apreciar que, en todos los casos en que hubo postratamiento, el cloro residual libre se encuentra dentro del rango establecido, siendo el mínimo valor obtenido de 0.50 mg/L en el sistema S8 y el máximo de 0.60 mg/L en los sistemas S2, S4 y S6.

Figura 37. Gráfico de cloro residual del agua tratada en los sistemas con postratamiento.



Al observar la Tabla 16, se puede afirmar que la desinfección por cloración cumplió con su cometido, ya que fue capaz de disminuir a 0.00 UFC/100 mL la cantidad de coliformes fecales remanentes en el único sistema (S4) que después de la filtración lenta de arena tuvo presencia de los mismos, teniendo en cuenta que el afluente del sistema S3 es el mismo del sistema S4 antes de aplicar cloro.

▪ **Análisis global de los sistemas de tratamiento**

En la Tabla 17 se resumen los resultados obtenidos luego de la implementación de los filtros a escala de laboratorio y se comparan con otros estudios similares, considerando que el mejor sistema implementado en el laboratorio fue el S4 para embalse y S8 para pozo, en los cuales se usó tanto pretatamiento como postratamiento.

Tabla 17. Resumen de los resultados en la presente investigación, comparados con otros estudios

Parámetros	Presente investigación (2016)	Jafvert, y otros (2011)	Torres Parra & Villanueva Perdomo (2014)	Österdahl (2015)
Remoción de Turbidez (%)	56.52 – 90.98	94.8 – 99.90	96.40	<99.00 %, en algunos casos hubo incremento de turbidez.
Remoción de coliformes fecales (%)	99.65 – 100.00	>99.00	100.00	-
Remoción de color (%)	< 70.25 %, en algunos casos hubo aumento de color	-	100.00	<37.50%, en algunos casos hubo incremento de color.
pH (Unidades)	7.67 – 8.05	-	7.20	5.7 – 7.9
Cloro residual (mg/L)	0.50 – 0.60	1.00 mg/L	No se hizo cloración	-
Arena usada	Arena de arroyo, lavada	Arena gruesa, lavada.	Arena de río y arena de peña, lavada	No especificada.
Columna de arena (cm)	38.00	35.56	55.00	40.00

A partir de los anterior se puede decir que los filtros lentos de arena construidos a escala de laboratorio presentaron altos porcentajes de remoción de turbidez y coliformes fecales, al igual que en las investigaciones de Jafvert y otros (2011) y Torres Parra & Villanueva Perdomo (2014), sin embargo, tanto en la presente investigación como en la realizada por Österdahl (2015) se obtuvo incremento en el color del efluente de los sistemas comparado con el color del afluente. Por otro lado, en las cuatro investigaciones comparadas en la tabla 16, el lecho filtrante solo estaba constituido por una columna de arena que hicieron variar entre 35.56 a 55.00 cm.

6.2.2.2. Muestras filtradas con el filtro LifeStraw Community

Para evaluar la eficiencia de estos filtros, se tomó agua proveniente del embalse y de los pozos profundos, la cual corresponde al mismo afluente que se usó en los sistemas de filtros lentos de arena implementados en el laboratorio, para medir en el agua filtrada los mismos

parámetros analizados anteriormente, color aparente, turbidez, coliformes fecales y pH. En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos con el filtro LifeStraw® Community.

Tabla 18. Análisis de las muestras de agua tratadas con el filtro LifeStraw Community.

Sistemas		Parámetros			
		Turbidez (UNT)	Color Aparente (UPC)	pH (Unidades)	Coliformes fecales (UFC/100mL)
Embalse	Afluente	16.63	195.00	7.61	3 100.00
	Muestra Filtrada	0.11	7.00	8.51	0
Pozo	Afluente	0.92	6.00	7.16	11.00
	Muestra Filtrada	0.08	0.00	7.48	0

Todos los parámetros analizados en el agua filtrada de ambos afluentes se encuentran por debajo de los valores máximos aceptables establecidos en la resolución 2115 de 2007, además se obtuvieron porcentajes de remoción superiores al 91 % como se presenta en la Tabla 19, resaltando que se obtuvo una remoción del 100% de los coliformes fecales.

Tabla 19. Porcentajes de remoción del filtro LifeStraw Community.

Parámetros	Afluente	% de remoción
Turbidez	Embalse	99.34
	Pozo	91.30
Color aparente	Embalse	96.41
	Pozo	100.00
Coliformes fecales	Embalse	100.00
	Pozo	100.00

6.2.2.3. Comparación del filtro LifeStraw Community y los filtros lentos de arena

El enfoque del grupo GEP de la Universidad de Purdue al diseñar los filtros lentos de arena fue el de garantizar una fácil construcción y la utilización de materiales locales en zonas rurales, de tal manera que fuera posible reducir costos y el tiempo de construcción, ya que actualmente muchas ONGs están entregando unidades de tratamiento de agua en estas zonas, que implican largos envíos hasta el sitio y un alto costo, como es el caso de los filtros

LifeStraw Community entregados en comunidades rurales de María la Baja, incluyendo la comunidad de San José de Playón.

Tanto los filtros lentos de arena cómo el filtro LifeStraw Community pueden ser operados por personal de la comunidad, ya que no requieren de habilidades especiales, pues solo se debe echar el agua en la parte superior de los filtros y esperar a que salga el agua filtrada; sin embargo, para el mantenimiento del filtro LifeStraw Community se debe realizar un retrolavado diariamente y semanalmente se debe desarmar para lavar, mientras que el mantenimiento de los filtros lentos solo consiste remover la capa superior lecho filtrante de arena cuando la película biológica sea tan espesa que obstruya el paso del agua, lo cual puede llegar a ocurrir hasta después de un año de operación.

Para comparar los resultados obtenidos en los sistemas de filtros lentos de arena con los obtenidos con el filtro LifeStraw Community, se tomaron como referencia los sistemas S4 y S8, en los cuales se usó todo el tren de tratamiento propuesto, es decir, pretratamiento, filtración lenta de arena y postratamiento. En las Figuras 38 y 39 se presenta la comparación con agua de embalse y de pozo respectivamente.

Figura 38. Comparación del sistema S4 con el filtro LifeStraw usando agua de embalse

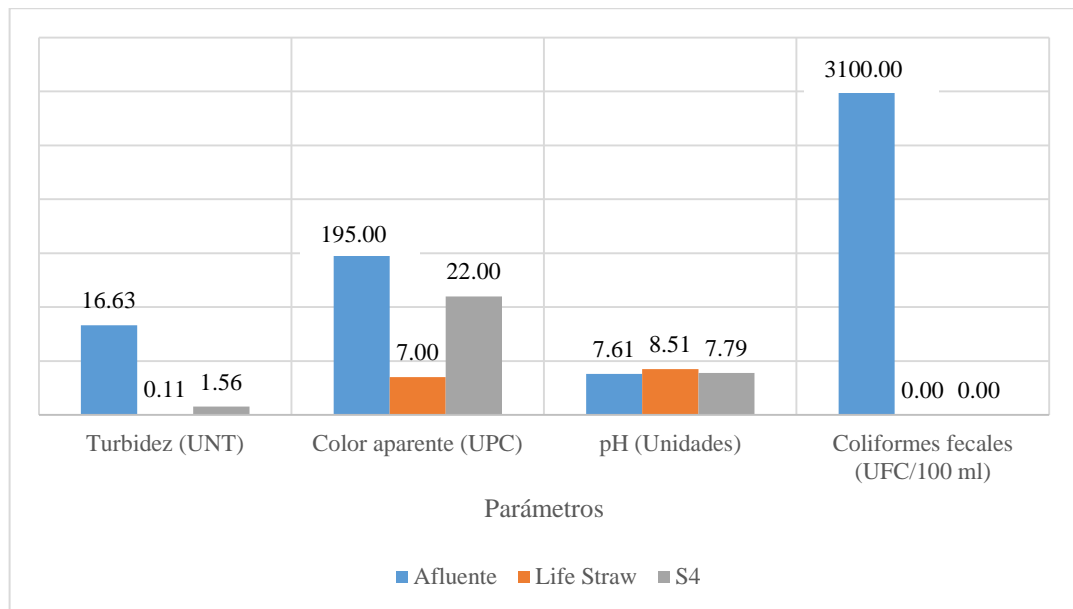
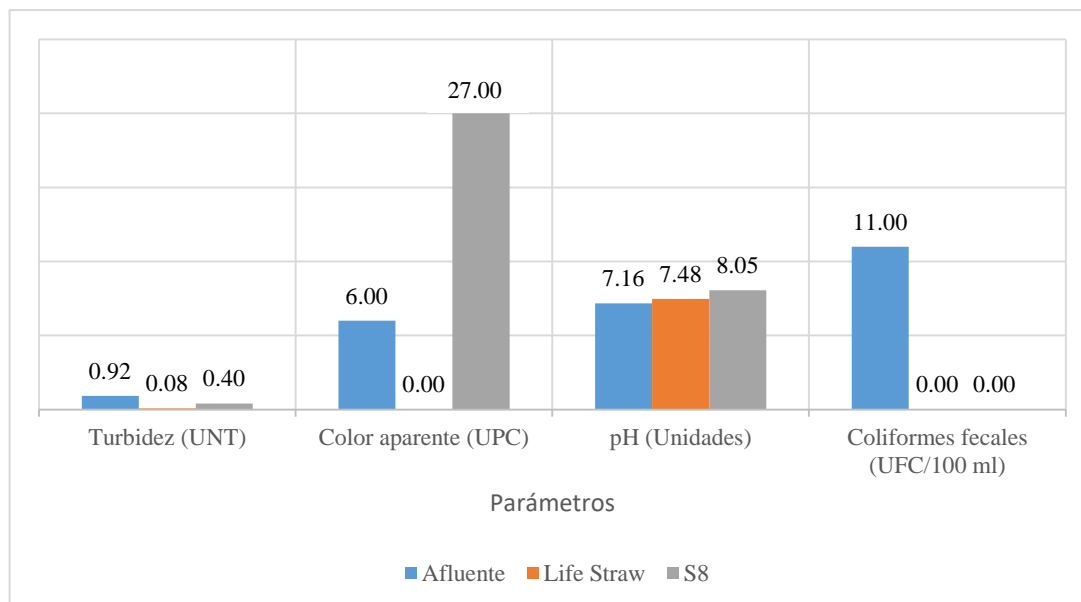


Figura 39. Comparación del sistema S8 con el filtro LifeStraw usando agua de pozo



El pH de las muestras filtradas con el filtro LifeStraw Community no presentó una gran variación y se mantuvo dentro del rango permitido por la normatividad colombiana, no obstante, el agua del embalse luego de filtrada alcanzó un pH de 8.51 unidades, es decir, se aproximó en mayor medida al límite máximo que el resto de sistemas estudiados.

En cuanto a remoción y de turbidez y color aparente, el filtro LifeStraw Community fue más eficaz, debido a que se obtuvo una mayor remoción en ambos casos en comparación con los sistemas a escala de laboratorio. Sin embargo, para la turbidez esta diferencia no fue muy marcada, ya que en el caso de agua del embalse el porcentaje de remoción del sistema S4 fue de 90.62%, mientras que para el filtro LifeStraw Community fue de 99.34%, resultando ambos por debajo del límite máximo establecido en la resolución 2115 de 2007.

El color aparente por su parte fue un parámetro con una tendencia a establecerse en valores de 22.00 UPC para el sistema S4 y 27.00 UPC para el sistema S8, superando el límite máximo

permitido por la resolución 2115 de 2007, mientras que el filtro LifeStraw Community logró reducir el color aparente hasta 7.00 UPC (agua del embalse) y 0.00 UPC (agua subterránea)

En los sistemas implementados en el laboratorio al igual que en el filtro LifeStraw Community se obtuvo una remoción del 100.00% de los coliformes fecales, tanto con el agua proveniente del embalse como con el agua de los pozos profundos, pero es importante resaltar que en los sistemas S4 y S8 se usó la cloración como postratamiento para prevenir una futura contaminación, mientras que en el otro filtro LifeStraw Community no se tiene esta seguridad posterior al tratamiento.

6.3. FILTROS LENTOS DE ARENA EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE SAN JOSÉ DE PLAYÓN

6.3.1. Operación de los filtros

Los filtros construidos en la Institución Educativa Técnica y Agropecuaria San José de Playón iniciaron operación el día 3 de agosto de 2016. Inicialmente se les aplicó agua del embalse de Arroyo Grande dos veces al día, en intervalos mayores a ocho horas, sin embargo, el sistema de distribución de agua del embalse dejó de funcionar y fue necesario seguir alimentando los filtros con agua lluvia, la cual se encontraba almacenada en un tanque de la escuela.

6.3.1.1. Capacidad

En vista de que los recipientes de 55 gal (208.00 L) se rellenaron en 2/3 de su volumen (138.00 L) con arena, se aplicó la cantidad de agua que cabe en los poros de la misma, la cual es aproximadamente 60.00 L, y permitiendo un tiempo de contacto entre el agua y la arena de ocho horas fue posible permitir hasta tres aplicaciones diarias de agua, con lo que la capacidad máxima de los filtros fue de 180.00. L de agua por día. Además, ambos filtros tuvieron un funcionamiento muy similar.

Cabe aclarar que la cantidad mínima de agua para aplicar por día debía ser de 60.00 L con el fin de evitar que se retuviera agua por más tiempo del necesario y de esta forma evitar la generación de malos olores.

6.3.1.2. Capa biológica

En la Figura 40 se observa la capa biológica de uno de los filtros implementados en la institución educativa del corregimiento y su evolución durante el periodo de monitoreo de los mismos.

Figura 40. Evolución de la capa biológica de uno de los filtros.
a. 12 de agosto. b. 19 de agosto. c. 9 de septiembre. d. 16 de septiembre.



La capa superficial de agua en estos filtros fue de 2.54 cm (1.00 in) y se puede apreciar que con el transcurrir de las semanas fue cada vez más notable la formación del *schmutzdecke* en la superficie de la arena (nótese la opacidad de la arena en la figura 37d).

6.3.2. Análisis del agua filtrada

El día 16 de septiembre, luego de seis semanas de estar funcionando los filtros en la institución, se tomaron muestras del afluente (agua del embalse), del agua después de filtrada

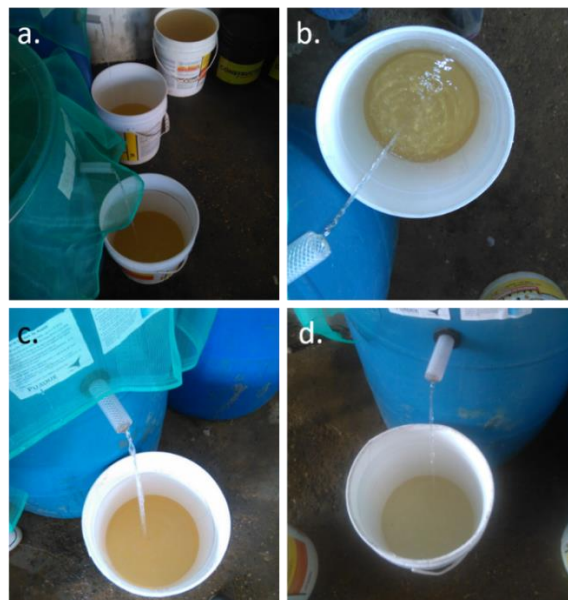
y del agua filtrada desinfectada con cloro, con las cuales se midieron los parámetros que se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Análisis de las muestras de agua tratadas con los filtros lentos de arena implementados en la Institución

Muestras	Parámetros					
	Turbidez (UNT)	Color Aparente (UPC)	pH (Unidades)	Hierro total (mg/L)	Manganeso total (mg/L)	Coliformes fecales (UFC/100mL)
Afluente (Embalse)	10.8	106.00	8.24	-	-	100
Agua filtrada	4.34	128.00	7.51	1.022	0.064	100
Agua filtrada y desinfectada con Cloro	1.82	71.00	7.53	-	-	0

Durante el periodo de operación de los filtros se presentaron eventualidades que afectaron su funcionamiento, como por ejemplo que no se les aplicaba agua todos los días y que cuando se les aplicaba el agua, ésta no era suficiente para desplazar toda el agua que había estado retenida, por lo que en más de una ocasión el agua de salida presentó olor y color característicos del agua estancada (ver figura 41).

Figura 41. Agua de salida de los filtros en la escuela.
a. 12 de agosto. **b.** 19 de agosto. **c.** 9 de septiembre. **d.** 16 de septiembre.

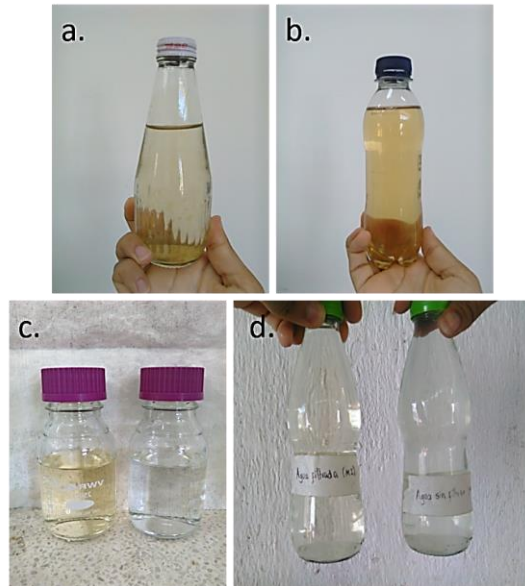


Por otro lado, existía la posibilidad de que el aumento en el color aparente del agua de salida fuera debido a la presencia de metales como hierro y manganeso en la arena usada como lecho filtrante, ya que ésta no fue lavada de forma adecuada, lo cual fue corroborado al analizar el agua de entrada y salida del filtro, ya que se obtuvo que el afluente no tenía presencia de hierro y manganeso en cantidades suficientes como para ser detectados por los instrumentos de medición usados al realizar los ensayos. En el efluente de los filtros por su parte, se encontró que el hierro presente en la muestra era de 1.022 mg/L, sobrepasando en un 240.67% el límite máximo establecido por la resolución 2115 de 2007 y el manganeso era de 0.064 mg/L, aún por debajo del límite máximo establecido por la norma (ver Tabla 7). Además, cuando era aplicada suficiente agua a los filtros para evitar el estancamiento, ésta presentaba olor ferroso al salir, debido a la concentración de hierro presentada en la tabla 20.

Con referencia al agua de entrada a los filtros, ésta presentaba en la mayoría de los casos la apariencia que se muestra a la derecha de la Figura 42 c y d, es decir, que el color de entrada era menor al color de salida. Sin embargo, después de la filtración en todos los casos se observó una reducción en la turbidez, como se muestra en la tabla 20, sin embargo, no se logró que este parámetro disminuyera por debajo del máximo establecido por la normativa colombiana.

El pH de las muestras analizadas y del agua afluente siempre se mantuvo dentro del rango establecido como apto para agua de consumo humano; al igual que el valor de cloro residual de 0.8 mg/L determinado luego de una dosificación de 0.09 mL de blanqueador por litro de agua filtrada (para un producto con concentración de cloro del 3.5%).

Figura 42. Agua de salida de los filtros de la escuela: comparación con agua de entrada (a la derecha).
a. 12 de agosto. **b.** 19 de agosto. **c.** 9 de septiembre. **d.** 16 de septiembre.



Las unidades formadoras de colonias de coliformes fecales solo fueron reducidas a cero luego de haber realizado la cloración al efluente, debido a que el filtro por sí mismo no fue capaz de remover las bacterias coliformes a causa de los ya mencionados factores que afectaron su desempeño durante las primeras semanas de operación.

6.4. RECOMENDACIONES A LA COMUNIDAD DE PLAYÓN SOBRE LA INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS FILTROS

Como producto de este proyecto de investigación se hizo entrega de un manual con recomendaciones para la construcción, operación y mantenimiento de los filtros lentos de arena tanto para uso domiciliario como institucional, este contiene los siguientes seis apartados: Conozca su filtro, construcción del filtro, maduración, uso diario, mantenimiento y recomendaciones generales (Ver Anexo D).

El cuadernillo del manual fue entregado al rector de la institución educativa de San José de Playón, quien se encargaría de su difusión en la comunidad, en la Figura 43 se presenta la portada del cuadernillo entregado.

Figura 43. Portada del manual de construcción, operación y mantenimiento.



6.5. SOCIALIZACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA APTA PARA EL CONSUMO Y DEL USO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA

La jornada de socialización del proyecto sobre los filtros lentos de arena en la comunidad se llevó a cabo con gran éxito durante tres días en la institución educativa de San José de Playón. Durante los dos días de construcción de los filtros, los estudiantes en pequeños grupos en compañía de algunos docentes de la institución y líderes de la junta comunal fueron conducidos por cada una de las fases de la construcción de estos, desde el secado de la arena hasta el armado de los filtros, donde pudieron observar el proceso mientras se les explicaba en qué consistía, cómo se muestra en la Figura 44, los estudiantes mostraron interés en el proyecto haciendo preguntas en cada una de las fases, manifestando sorpresa al comprender que el lecho filtrante solo estaba conformado por arena de la región.

Figura 44. Explicación de las fases del proceso de construcción de los filtros a la comunidad



En el tercer día, los directivos de la institución reunieron a todos los estudiantes en el patio, donde se realizó la charla de socialización, en la cual se trataron temas como la calidad del agua que actualmente están consumiendo en la comunidad, la importancia de realizar tratamientos al agua para garantizar su potabilización y la construcción y operación de los filtros. Con respecto a la calidad del agua, se mencionó que el agua proveniente del embalse Arroyo Grande no es apta para el consumo humano como se indicó en la fase diagnóstica de esta investigación, por lo que es necesario realizar procesos de tratamiento al agua previos a su consumo, presentándoles la filtración lenta de arena acompañado de la cloración como una excelente alternativa para mejorar la calidad del agua y de esta forma garantizar que el agua usada por los estudiantes sea agua potable, por lo cual manifestaron gran interés en continuar con la operación de los filtros y su mantenimiento cuando lo requiera.

Además, el postratamiento de desinfección con cloro fue socializado antes dos docentes de la institución, quienes estarían liderando la operación de los filtros (ver Figura 45), donde se les explicó la química del proceso y la dosificación de cloro que se debía usar, teniendo en cuenta que se usó una sustancia con cloro al 3.5%.

Figura 45. Socialización del proceso de cloración ante dos docentes de la institución educativa de Playón



Al finalizar con la jornada de socialización, el rector de la institución se mostró agradecido por haber desarrollado este proyecto en San José de Playón y la comunidad se comprometió a seguir con la operación de los filtros.

Por otro lado, el proyecto y la experiencia que se tuvo con la construcción y puesta en marcha de los filtros en la institución fue socializada ante la comunidad educativa de la Universidad de Cartagena el día 04 de agosto de 2016, a la cual asistieron principalmente estudiantes del programa de ingeniería civil, donde el profesor Jafvert habló el funcionamiento de los filtros y su amplia experiencia en la instalación de estos en zonas rurales, y las estudiantes a cargo de esta investigación hicieron una presentación del proceso de construcción y la experiencia en San José de Playón.

7. CONCLUSIONES

Basados en la presente investigación sobre la evaluación de la filtración lenta de arena como método para la potabilización del agua en el corregimiento de San José de Playón, se pudo concluir lo siguiente:

- Los filtros lentos de arena construidos a escala de laboratorio en la Universidad de Cartagena permitieron mejorar la calidad del agua proveniente del embalse de Arroyo Grande y de los pozos profundos, ya que removieron coliformes fecales en un 100.00% y turbidez hasta en 85.51%, en cuanto al color el filtro que operaba con agua del embalse removió hasta 70.25%, sin embargo, el filtro operado con agua de pozos, aumentó su color de 6.00 a 25.00 UPC. No obstante, a pesar de que se mejoró la calidad del agua, se puede concluir por los parámetros estudiados que esta aún no es apta para el consumo humano debido a que los parámetros de color y turbidez se encuentran por encima del límite establecido en la normatividad colombiana.
- La filtración con grava y cloración, seleccionados respectivamente como pretratamiento y postratamiento en los sistemas a escala de laboratorio, permitieron mejorar la eficiencia de estos, ya que se obtuvo una mayor remoción de turbidez en presencia de la filtración con grava, alcanzando una remoción de hasta el 90.98%, con lo cual se garantizó que este parámetro estuviera por debajo del límite máximo establecido en la normatividad Colombiana; y al incluir la cloración como postratamiento en el sistema se mantuvo como nula la presencia de coliformes, cumpliendo así con el objetivo planteado, con lo cual se concluye que los sistemas con mejor desempeño fueron aquellos que incluyeron en el tren de tratamiento la Prefiltración con grava y la cloración, es decir, S4 y S8.
- Los filtros lentos de arena construidos en la Institución educativa Técnica y Agropecuaria de San José de Playón tuvieron un desempeño inferior al obtenido con los filtros construidos a escala de laboratorio, ya que luego de seis semanas el afluente de estos aún presentaba un notable color amarillento debido a la presencia de hierro y manganeso en la arena; turbidez por encima del límite máximo, y el parámetro de coliformes fecales en

el afluente y efluente permaneció constante, es decir, no hubo remoción de coliformes fecales, lo cual indica que el *schmutzdecke* no se desarrolló. Una situación similar fue evidenciada en zona rural del Huila, donde la turbidez, color aparente y bacterias coliformes no presentaron mejoría con respecto al agua afluente debido a que la arena utilizada no presentaba las mejores características para el funcionamiento del filtro.

- La presencia de hierro y manganeso en la arena es un indicativo de que ésta no fue lavada apropiadamente, lo cual tuvo gran incidencia en la extensión del periodo de maduración del filtro y en la eficiencia de remoción de turbidez, color y coliformes fecales, en los filtros construidos en la institución educativa en Playón.
- Durante el periodo de operación de los filtros en la escuela se presentaron eventualidades que afectaron su funcionamiento, como que no se les aplicaba agua todos los días y que cuando se les aplicaba el agua, ésta no era suficiente para desplazar toda el agua que había estado retenida, por lo que en más de una ocasión el agua de salida presentó olor y color característicos del agua estancada.
- Los resultados obtenidos con los sistemas de filtros lentos de arena construidos a escala de laboratorio fueron muy similares a lo obtenido en investigaciones previas en las que también se evaluó la eficiencia de los filtros por medio de la construcción de filtros, en las cuales se obtuvo una remoción de turbidez por encima del 90.00% y de coliformes fecales superior al 99.00%, manteniendo el del efluente pH entre 7.00 y 9.00, pero en cuanto al parámetro color, se difiere con algunas investigaciones previas, ya que en la presenta investigación no se obtuvieron altos porcentajes de remoción e incluso en algunos casos el agua filtrada presentó un mayor color que el afluente, lo cual solo coincide con lo obtenido en una investigación realizada en Colombia por una universidad sueca.
- Tanto los sistemas con filtros lentos de arena como el filtro LifeStraw Community son adecuados para el tratamiento del agua en el punto de uso, garantizando el cumplimiento de la reglamentación Colombiana en términos de turbidez, pH y coliformes fecales, sin

embargo los filtros LifeStraw resultaron más eficientes para la remoción de color. No obstante, considerando variables económicas, operativas, mantenimiento y vida útil de los sistemas, los filtros lentos de arena resultan más ventajosos teniendo en cuenta el contexto de las comunidades rurales del país.

- Debido al apoyo y cooperación brindados por el grupo de Global Engineering Program (GEP) de la Universidad de Purdue, la Corporación de Desarrollo Solidario de Bolívar, el Grupo de Investigación Modelación Ambiental y la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique fue posible obtener información valiosa para el desarrollo de la investigación y de esta manera beneficiar a la comunidad de la Institución Educativa Técnica y Agropecuaria de San José de Playón.
- El estudio se llevó a cabo en una zona muy significativa que refleja la situación actual en materia del acceso al agua potable de muchas regiones rurales del país, puesto que solo en el municipio de María La Baja el 82% de las comunidades rurales nunca ha contado con el suministro de agua potable, por lo que dar a conocer una solución simple y efectiva a la problemática como lo fue la construcción de filtros lentos de arena en San José de Playón, puede llevar a que otras comunidades se animen a implementarlos siguiendo su ejemplo.

8. RECOMENDACIONES

8.1. RECOMENDACIONES PARA IMPLEMENTACIÓN EN OTRAS COMUNIDADES RURALES

- Se recomienda que se construyan los filtros lentos de arena en la comunidad siguiendo las mismas instrucciones y medidas de los construidos en el laboratorio, esto es, preparar y lavar la arena y/o grava de forma tal que se evite un prolongamiento innecesario del periodo de maduración a causa de la liberación de partículas indeseadas de la arena. También resultaría conveniente construir los filtros en el laboratorio y mantenerlos allá durante el periodo de maduración ya que los habitantes de la comunidad podrían desmotivarse cuando al pasar el tiempo los filtros aun no estén funcionando.
- Para la construcción de los filtros es importante conocer el número de personas a atender en la comunidad, ya que esto determinará el tamaño y el número de filtros a construir. Se debe tener en cuenta que los filtros de arena no pueden ser tan pequeños, puesto que se debe garantizar una columna de arena y un tiempo de contacto mínimo como se ha establecido en estudios anteriores, y tampoco pueden ser de gran tamaño debido a las implicaciones de grandes volúmenes necesarios para su construcción y un mayor tiempo de maduración.
- Luego de la construcción de los filtros en alguna comunidad, se recomienda seguir en contacto regularmente con ellos, para monitorear el estado de los filtros, analizar muestras del agua tratada y ver si les están dando un uso adecuado, garantizando de esta forma el buen funcionamiento de los filtros.

8.2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

- Se recomienda analizar la calidad del efluente de los sistemas de tratamiento en intervalos constantes de tiempo, por medio de la medición semanal de parámetros como color, turbidez y coliformes hasta obtener los valores deseados y constantes, lo cual permitirá

monitorear el funcionamiento de los filtros en sus primeras semanas de operación y conocer la duración exacta del periodo de maduración.

- Dado que con los filtros construidos en la presente investigación no se obtuvo una gran remoción de color en el agua tratada, e incluso en algunos casos se obtuvo efluentes con mayor color que el afluente, se recomienda seguir con la investigación de métodos no convencionales que permitan remover el color hasta alcanzar valores por debajo del límite máximo establecido en la normatividad, para de esta forma optimizar y mejorar el sistema de tratamiento presentado en esta investigación.

8.3. LIMITACIONES DEL PROYECTO

- Debido a la falta de disponibilidad de equipos y reactivos en el laboratorio de saneamiento de la Universidad de Cartagena y a la falta de recursos económicos de los investigadores del presente trabajo de grado, no fue posible llevar a cabo un mayor número de ensayos durante un periodo más prolongado de tiempo; en consecuencia, es conveniente buscar fuentes de financiación para llevar a cabo la investigación. Para el caso de este tipo de proyectos con pertinencia social, es posible acudir a organizaciones no gubernamentales o a corporaciones sociales departamentales o regionales.
- En la presente investigación se evaluó el desempeño de sistemas de tratamiento con filtros lentos de arena a escala de laboratorio y la implementación de filtros lentos de arena en la escuela de la comunidad de San José de Playón, por lo que fue necesario invertir más tiempo y recursos en el monitoreo de cada etapa, debido a ello se recomienda que en futuros proyectos se delimite el objeto de estudio, ya sea evaluando sistemas de tratamiento en el laboratorio o implementado soluciones en comunidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar Hernández, D., & Portela Cuevas, W. (2009). *Diseño y montaje del laboratorio de filtro lento de arena para agua potable*. Girardot, Colombia.
- Alcaldía de María La Baja. (2001). Plan de Ordenamiento Territorial de María La Baja 2001 - 2009. María La Baja, Bolívar, Colombia.
- Arboleda Valencia, J. (1975). *Teoría de la filtración del agua*. Lima, Perú: CEPI.
- Ayuda en Acción Colombia & Corporación Desarrollo Solidario. (2015). *Nota conceptual: Agua Potable y Organización comunitaria para la población rural del norte del departamento de Bolívar Colombia*. Colombia.
- Barrenecha, A., & De Vargas, L. (2004). Capítulo 10: Desinfección. En *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida* (págs. 155-213). Lima: CEPIS, OPS.
- Barrientos Echegaray, H., Tello Yarin, J., Tito Pacheco, C., & Palomino Gamarra, M. (2009). *Purificación de agua por medio de filtros lentos de arena en la comunidad de Kuychiro - Cusco*. Cusco, Perú.
- Blacio Ordóñez, D., & Palacios Pérez, J. (2011). *Filtros biológicos para la potabilización del agua, posibilidades de uso de FLA (filtros lentos de arena) con agua superficial de nuestra región*. Cuenca, Ecuador: Tesis de Pregrado de la Universidad de Cuenca.
- Canal Voluntarios. (2015). *Memoria del proyecto: Convocatoria de ayudas 2015 para actuaciones de cooperación al desarrollo en agua y saneamiento de Cana Isabel II*. Madrid, España.
- Cánepa, L. (Junio de 1992). *Filtración Lenta: Teoría y Evaluación*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Cánepa, L. (1994). *Filtración lenta como proceso de desinfección*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Caro, D., Aguirre, A., Vallejo, D., & Quiroga, C. (18 de Septiembre de 2015). *Distrito de Riego de Maríalabaja Agua y Tierra: Un problema de todos*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de

<http://montesdemariamitierramidentidad.blogspot.com.co/2015/09/distrito-de-riego-de-marialabaja-agua-y.html>

- Centre for Affordable Water and Sanitation Technology. (2008). *Biosand Filter Manual*. Calgary, Canada: CAWST.
- Centro Internacional de Referencia para abastecimiento público de agua de la OMS. (1978). *Filtración Lenta en Arena para Abastecimiento Público de Agua en Países en Desarrollo*. La Haya, Países Bajos: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres del Municipio de María La Baja. (2013). Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del Municipio de María La Baja. María La Baja, Bolívar, Colombia.
- Dávila, A. (1999). *Métodos y técnicas cualitativas de investigación en ciencias sociales*. Madrid.
- Galvis Castaño, G., Latorre Montero, J., & Visscher, J. (1999). *Filtración en múltiples etapas: tecnología innovativa para el tratamiento de agua*. Cali, Colombia: IRC, CINARA & Universidad del Valle.
- Gottinger, A., Mc Martin, D., Price, D., & Hanson, B. (2011). The effectiveness of slow sand filters to treat Canadian rural prairie water. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 455-463.
- Granados, D., & Peña, J. (2016). Evaluación de alternativas para un sistema sostenible de abastecimiento de agua potable para los corregimientos de San Joaquín, Monroy y San Francisco en el Departamento de Bolívar. Cartagena de Indias D. T. y C., Colombia: Univesidad de Cartagena.
- Guchi, E. (2015). Review on Slow Sand Filtration in Removing Microbial Contamination and Particles from Drinking Water. *American Journal of Food and Nutrition*, 47-55.
- Hernández , R., & Fernández, C. (2010). *Metodología de la investigación, Quinta edición*. México: Mc Graw Hill.
- Hernández Meléndrez , E. (2006). *Metodología de la Investigación: Cómo escribir una tesis* . Chile: Escuela Nacional de Salud Pública .
- Huisman, L., & Wood, W. (1974). *Slow Sand Filtration*. Ginebra. Suiza: World Health Organization .

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1995). *NTC-ISO 5667-1: Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Muestreo. Directrices para el diseño de programas de muestreo*. Bogotá, D.C. .
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidro geológicas de Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- Itaca. (1 de Diciembre de 2005). *An Introduction To Slow Sand Filtration*. Recuperado el 5 de Marzo de 2016, de Itaca: http://www.itacanet.org/doc-archive-eng/water/Intro_SSF.pdf
- Jafvert, C., Rivas, J., Collins, C., Chi, Z., Pike, D., Ficht, N., . . . Ohlemiller, J. (2011). *Drinking Water Issues in Rural Colombia*. West Lafayette, USA: Purdue University.
- Jellison, K., Dick, R., & Weber-Shirk, M. (2000). Enhanced Ripening of Slow Sand Filters. *Journal of environmental engineering*, 1153-1157.
- Julio, J., Palacio, E., & Villabona, A. (2007). *Evaluación del proceso de filtración con aguas sintéticas a tasa constante y nivel variable de la planta piloto de filtración, contruida en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cartagena. (Tesis de pregrado)*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Junta de Castilla y León, Consejería de Sanidad. (2009). *Manual de tratamientos del agua de consumo humano*. Castilla y León, España: Gráficas Lafalpoo, S.A.
- Lea, M. (2014). Biological Sand Filter: Low-Cost Bioremediation Technique for Production of Clean Drinking Water. *Current Protocols in Microbiology*, 33:1G.1.1-1G.1.26.
- Malapane, T. (2011). Water and Health in Limpopo: implementing a safe, sustainable water supply system. *Institute of Electrical and Electronic Engineers System and Information Engineering Design Sysposium*, 100-103.
- Manav Demir, N. (2016). Experimental Study of Factors that Affect Iron and Manganese Removal in Slow Sand Filters and Identification of Responsible Microbial Species. *Polish, Journal of Environmental Studies*, 1453-1465.
- Marco, L., Azario, R., Metzler, C., & García, M. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución ene la ciudad de

- Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 72-82.
- Meneses, J., & Rodríguez, D. (2011). *El cuestionario y la entrevista*. Barcelona, España: Editorial UOC.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2012). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, Título C*. República de Colombia.
- Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (22 de Junio de 2007). Resolución No. 2115 de 2007. Bogotá D. C., Colombia.
- Ministerio de la protección social. (9 de Mayo de 2007). Decreto No. 1575 de 2007. Bogotá D. C., Colombia.
- National Environmental Service Center. (2015). *National Environmental Service Center*. Recuperado el 8 de Marzo de 2016, de <http://www.nesc.wvu.edu/>
- National Environmental Services Center. (2009). Filtración Lenta con Arena. *Tecnología en Breve*, 1-4.
- Oocities. (2009). *Desinfección y métodos de desinfección del agua*. Recuperado el 13 de Mayo de 2016, de OoCities.org: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/desinfeccion5.pdf>
- Orellana, J. (2005). *Ingeniería Sanitaria*. Rosario, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Vol 1: Recomendaciones. Tercera Edición*. Suiza : Biblioteca de la OMS.
- Organización Panamericana de la Salud - Representación en Colombia. (Mayo de 1999). *Filtros*. Recuperado el 16 de Abril de 2016, de Guía Latinoamericana de tecnologías alternativas en agua y saneamiento: <http://www.col.ops-oms.org/saludambiente/guia-filtros.htm>
- Österdahl, M. (Junio de 2015). *Slow sand filtration as a water treatment method: An inventorying study of slow sand filters purification rates in rural areas in Colombia (Tesis de pregrado)*. Suecia: Karlstads University.
- Paraplásticos. (2014). *Paraplásticos, Envases de 5 Galones*. Recuperado el 6 de Abril de 2016, de Paraplásticos: Envasamos excelencia: <http://www.paraplasticos.com/productos/envase-5-galones>


- Pérez Carrión, J., & Canepa de Vargas, L. (1992). *Filtración Lenta. Manual II: Diseño*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Piñol, M. K. (2009). Plande manejo/auto gestión de captación y distribución por gravedad de agua para uso doméstico en San Luis, Salta. Salta, Argentina.
- Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Colombia: Ediciones de la U.
- Rice, E., Baird, R., Eaton, A., & Clesceri, L. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Sawyer International. (2016). *Sawyer PointONE filter with Bucket Adapter Kit - 1 ft hose*. Recuperado el 13 de Mayo de 2016, de <https://sawyer.com/international/products/sawyer-pointone-filter-bucket-adapter-kit-1-ft-hose/>
- Solsona, F., & Méndez, J. (2002). *Desinfección del agua*. Lima, Perú: CEPIS.
- Tamayo y Tamayo, M. (2002). *El proceso de la Investigación Científica*. México: Limusa, Noriega Editores.
- Tiwari, S.-S., Schmidt, W.-P., Darby, J., Kariuld, Z., & Jenkins, M. (2009). Intermittent slow sand filtration for preventing diarrhoea among children in Kenyan households using unimproved water sources: randomized controlled trial. *Tropical Medicine and International Health*, 1374-1382.
- Torres Parra, C., & Villanueva Perdomo, S. (2014). *El filtro de arena lento: manual para el armado, instalación y monitoreo*. Bogotá, Colombia: Universidad Piloto de Colombia.
- Vargas, N. (2001). Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- Vestergaard. (3 de Septiembre de 2016). *LifeStraw® Products: LifeStraw Community*. Recuperado el 28 de Julio de 2016, de Vestergaard, Impacting people: <http://www.vestergaard.com/lifestraw-community>
- Villabona, Á. (2006). *Calibración de las unidades de filtración rápida para remoción de turbidez en aguas sintéticas en la planta piloto construida en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cartagena (Tesis de especialización)*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.

Visscher, J., Paramasivam, R., Raman, A., & Heijnen, H. (1992). *Filtración Lenta en Arena: Tratamiento de Agua para Comunidades, Planeación, Diseño, Construcción Operación y Mantenimiento*. Cali, Colombia: IRC, International Water and Sanitation Centre.

World Health Organization. (2014). *Programmes: Water Sanitation Health*. Recuperado el 23 de Marzo de 2016, de World Health Organization Web site:
http://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/emergencies/envsanfactsheets/en/index1.html

ANEXOS

Anexo A. Cotización de los ensayos para la determinación del IRCA por CARDIQUE.

		LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL CARDIQUE		
COTIZACIONES				
Fecha de Elaboración 01-2015	Fecha de la Última Revisión 05-2016	Revisión No. 2	Pág. 1 de 1	F-GES-99

007-4123-16

Caragana de Indias, julio 11 de 2016

Señora
Wendy García Méndez
Ciudad

Estimada Señora,

De acuerdo a su solicitud enviamos propuesta económica para análisis físico-químicos de agua. Se cotizan los parámetros que se encuentran dentro el alcance de nuestro laboratorio. Los costos totales del monitoreo serían los siguientes:

PARAMETROS	MÉTODOS	MUESTRAS	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
COLOR APARENTE	COLORIMETRICO	2	5.500,00	11.000,00
TURBIDEZ	NEFELOMETRICO	2	6.900,00	13.800,00
PH	ELECTROMETRIA	2	5.500,00	11.000,00
CLORO RESIDUAL	COLORIMETRIA	2	13.800,00	27.600,00
CALCIO	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
FOSFATO	ESPECTROFOTOMETRIA	2	13.800,00	27.600,00
MANGANESEO	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
MOLIBDENO	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
MANGNESEO	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
ZINC	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
HIERRO TOTAL	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
NITRATOS	ESPECTROFOTOMETRIA	2	23.500,00	47.000,00
NITRITOS	ESPECTROFOTOMETRIA	2	20.500,00	41.000,00
ALUMINO	ABSORCION ATOMICA	2	40.100,00	80.200,00
COT	KIT	2	41.400,00	82.800,00
COLIFORMES TOTALES	SUBSTRATO DEFINIDO	2	20.500,00	41.000,00
E. COLI	SUBSTRATO DEFINIDO	2	20.500,00	41.000,00
COLIFORMES FECALES	TUBOS MULTIPLES	2	20.500,00	41.000,00
TOMA DE MUESTRAS X DIA		1	55.100,00	55.100,00
SUBTOTAL				1.025.500,00
TOTAL				1.025.500,00
IVA DEL 16%				160.680,00
GRAN TOTAL				1.186.180,00

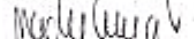
En caso de no requerir el servicio de toma de muestras, es decir, entregando las muestras directamente en el laboratorio para su análisis estas deben ser entregadas en el horario de lunes a viernes de 7am a 12pm o de 1pm a 4:00pm.

Los precios son establecidos en base a la Resolución 26 del 2010 de Cardique.

Para confirmar el servicio por favor diligenciar el formato de Solicitud de Servicios anexo a esta cotización. Los resultados serán entregados en máximo 15 días hábiles después del ingreso de la última muestra al laboratorio.

Para personas jurídicas el servicio será facturado una vez emitido el informe con un plazo de 30 días para su cancelación en el banco indicado en la factura correspondiente. Para personas naturales el servicio deberá ser cancelado previo a la entrega del informe de resultados.

Cordialmente,



MADY C. GARCIA VERGARA

Jefe de Oficina del Laboratorio de Calidad Ambiental

Bosque Sector Manzanillo, Trasn. 52 N° 16-190

Tel 6694262-6694059

http://www.cardique.gov.co - email: laboratorio@cardique.gov.co

Anexo B. Cuestionario empleado como base para la entrevista realizada en la primera visita al Corregimiento de San José de Playón.

Parte 1. Comunidad en general

1. ¿Utiliza el agua que llega a su casa para el consumo?
2. ¿El servicio de agua es continuo?
3. ¿Cuál es su fuente de consumo?
4. ¿Tiene algún gasto por utilizar otra fuente?
5. ¿Se ha presentado escasez de agua alguna vez?
6. ¿Conoce o utiliza algún método para mejorar la calidad del agua?
7. ¿Siente que si calidad de vida o salud se ha visto afectada por el agua que usa?
8. ¿Conoce a alguien que se haya enfermado a causa del agua?

Parte 2. Escuela o puesto de salud

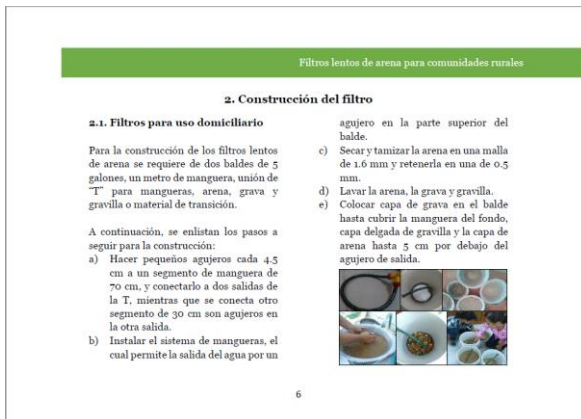
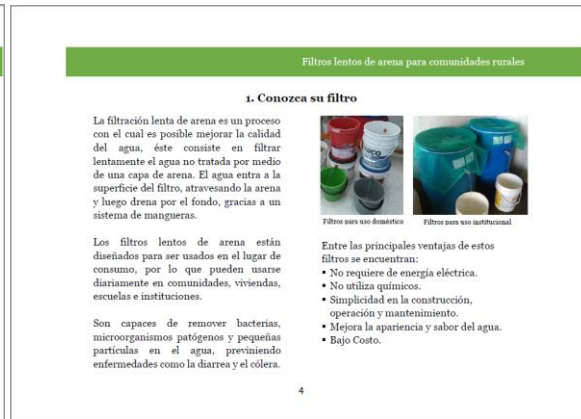
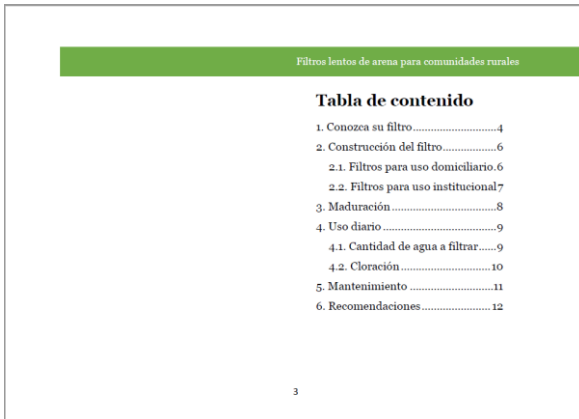
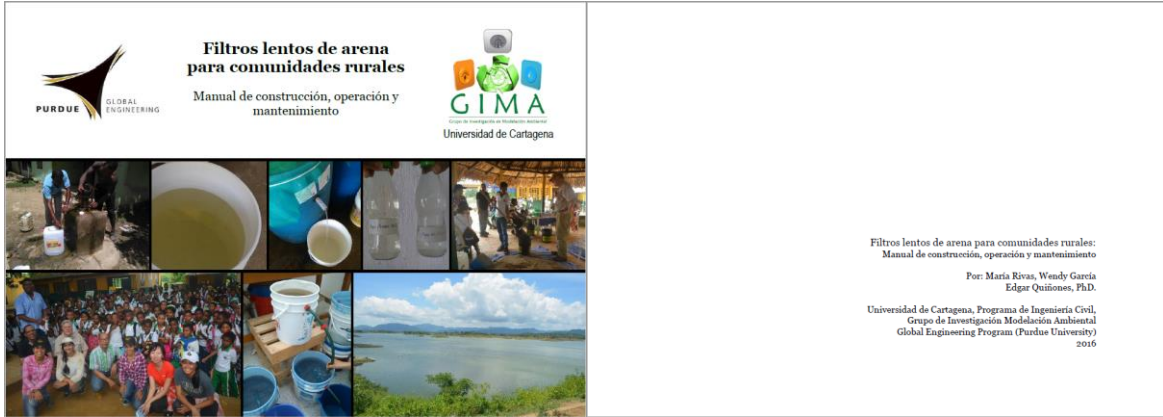
1. ¿Cuál es la fuente de agua para consumo de los estudiantes?
2. ¿El servicio de agua es continuo?
3. ¿Se ha presentado escasez de agua alguna vez?
4. ¿Se ha visto afectada la salud de los niños y/o enfermos debido a la calidad del agua?
5. ¿Conoce o realiza algún tipo de tratamiento para el agua antes de su consumo en la institución?
6. ¿Existe alguna propuesta para mejorar la calidad del agua en la institución?

Anexo C. Sistemas acuíferos de Colombia (IDEAM, 2013).



Fuente: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2013).

Anexo D. Manual construcción, operación y mantenimiento de filtros lentos de arena para comunidades rurales



Filtros lentos de arena para comunidades rurales

2.2. Filtros para uso institucional

Para construir un filtro de uso institucional se requiere de un tanque de 55 galones, 3.0 m de manguera, unión de "T" para mangueras, arena, grava y gravilla o material de transición.

A continuación, se enlistan los pasos a seguir para la construcción:

- Secar la arena.
- Tamizar la arena en una malla de 1.6 mm y retenerla en una de 0.5 mm.
- Lavar la arena
- Amar el filtro: para el armado de los filtros con un sistema de mangueras se puede seguir las mismas instrucciones que en el filtro de uso domiciliario, solo que usando una

manguera de mayor diámetro y resistencia. De forma alternativa se propone el uso de un plato plástico poroso en el fondo, con lo cual no se coloca la manguera que rodea el fondo, ni la grava.

e) Colocar capa de grava en el tanque hasta cubrir la manguera del fondo, capa delgada de gravilla y la capa de arena, o solo la capa de arena si se usa el plato poroso.



7

Filtros lentos de arena para comunidades rurales


3. Maduración

Durante los primeros días de operación del filtro, aproximadamente en las primeras 3 a 5 semanas, ocurre el proceso de maduración del filtro, en el cual crece una capa biológica sobre la superficie del lecho de arena, la cual está constituida por material de origen orgánico o microorganismos "buenos", encargados de atrapar, digerir y degradar la materia orgánica contenida en el agua a tratar.

Durante este periodo de maduración, el agua que sale del filtro no debe ser usada para su consumo, puesto que aún puede contener microorganismos patógenos.

Para garantizar la formación de la capa biológica se debe alimentar los filtros con agua todos los días, entre mayor cantidad de materia orgánica tenga el agua usada, más rápido será el crecimiento de esta.

Esta capa es muy delgada por lo que no se puede apreciar fácilmente, solo se observa un leve cambio en el color de la superficie de arena, como se muestra a continuación.



Para conservar la capa biológica se recomienda usar un plato difusor para dispersar el agua de forma tal que esta no caiga de forma directa y fuerte sobre la superficie de arena.

8


Filtros lentos de arena para comunidades rurales

4. Uso diario

4.1. Cantidad de agua a filtrar

Una vez transcurrido el periodo de maduración, usted podrá usar su filtro diariamente, aplicándole agua cada ocho (8) horas, es decir, un máximo de tres (3) aplicaciones por día.

Si cuenta con un filtro pequeño, deberá echar 10 L de agua en cada aplicación, y en caso de contar con una unidad grande, deberá echar 60 L de agua en cada aplicación, con el fin de desplazar y usar toda el agua que se encontraba en contacto con la arena. De este modo usted podrá obtener hasta 180 L de agua al día si cuenta con un filtro de uso institucional y hasta 30 L si cuenta con un filtro de uso doméstico.



Es importante que incluso durante la aplicación del agua al filtro, se mantenga la malla protectora contra los vectores como mosquitos y otros insectos, ya que ésta también funciona como mecanismo de retención de grandes partículas.

9

Filtros lentos de arena para comunidades rurales

4.2. Cloración

Luego del proceso de filtración, es necesario que se lleve a cabo la desinfección del agua tratada, esto se realiza a través de la aplicación de algunas gotas de cloro (limpido) al agua para luego dejarla reposar durante un periodo mínimo de 30 minutos con el fin de que el agua entre en contacto con el cloro para eliminar los microorganismos que pudieron haber quedado luego del proceso de filtración y para prevenir contaminación futura.

A continuación, se muestra una tabla que indica la cantidad de limpido o producto con cloro a aplicar según sea la cantidad de agua filtrada.

N° de litros	N° de gotas de limpido a usar
1	3
2	5
3	8
4	10
5	12
6	15
7	17
8	20
9	22
10	24
15	36
20	48
30	72


10

Filtros lentos de arena para comunidades rurales

5. Mantenimiento

Después de algún tiempo de estar usando su filtro, éste puede empezar a funcionar más lentamente, esto se debe principalmente a que los poros de la arena han sido obstruidos por las partículas presentes en el agua, para solucionar este problema, basta con retirar la capa superficial de arena (unos 3 cm), enjuagarla con agua limpia y volverla a poner en el filtro. Sin embargo, pueden transcurrir algunos meses e incluso años antes de que esto sea necesario.

Si la anterior solución no mejora la velocidad de salida del agua, puede significar que la arena se ha obstruido a mayor profundidad, en ese caso, sería conveniente sacar toda la arena del filtro y lavarla con agua limpia para después colocarla nuevamente o reemplazarla por completo por nueva arena, por lo que habría que esperar nuevamente el periodo de maduración. Esto generalmente ocurre cuando el filtro tiene varios años de estar funcionando.



11

Filtros lentos de arena para comunidades rurales

6. Recomendaciones

Para sacarle el mayor provecho a su filtro lento de arena es recomendable que:

- Lave muy bien la arena durante la construcción del filtro.
- Eche la cantidad de agua necesaria para cada tipo de filtro.
- No deje pasar más de 24 horas sin echarle agua a su filtro.
- Espere el tiempo de maduración recomendado antes de empezar a consumir el agua tratada.
- Use el agua filtrada que se obtiene durante el periodo de maduración para aseo u otros usos, pero no para el consumo

ya que aún no está apta para ello.

- Espere las ocho (8) horas necesarias para el tiempo de contacto entre el agua y la arena.
- No limpie la malla de protección del filtro con objetos duros y punzantes.
- Los recipientes y tazas para tomar el agua deben estar siempre limpias y desinfectadas.
- Siempre lívese las manos antes de usar su filtro y tomar agua.
- No toque la salida de agua filtrada con las manos sucias u otros objetos.

12

Filtros lentos de arena para comunidades rurales

- Si la manguera de salida de agua filtrada aparenta estar sucia en su exterior, límpiela con agua purificada.
- Siempre añada cloro al agua después de filtrada.
- Espere un tiempo mínimo de contacto entre el agua y el cloro de 30 minutos.

13