



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**GENERACIÓN Y SELECCIÓN DE
ALTERNATIVAS DE FILTRACIÓN DEL AGUA
PARA EL ABASTECIMIENTO DOMÉSTICO**

Autora:

Mariana Botero Rivera

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



GENERACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE FILTRACIÓN DEL AGUA
PARA EL ABASTECIMIENTO DOMÉSTICO

Mariana Botero Rivera

Trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniera Sanitaria

Asesor

Diego Alejandro Chalarca Rodríguez.
Ms. Eng., Ingeniero sanitario

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2021.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	9
2. Planteamiento del problema	10
3. Objetivos	11
3.1. Objetivo general.....	11
3.2. Objetivos específicos	11
4. Marco normativo	11
4.1. Características del agua potable.....	12
5. Marco teórico sobre tratamientos de potabilización.	14
5.1. Filtración	14
5.1.1. Medios filtrantes	16
5.2. Desinfección	17
5.2.1. Ozonificación.....	18
5.2.2. Radiación ultravioleta (UV)	18
5.2.3. Cloración	19
5.2.4. Desinfección solar	20
5.2.5. Plata coloidal	21
6. Estado del arte	22
6.1. Filtración	22
6.2. Desinfección	36
6.2.1. Cloración	36
6.2.2. Desinfección solar	38
6.2.3. Plata coloidal	40
7. Discusión.....	42
8. Alternativa de diseño del sistema de filtración y desinfección.	43
9. Conclusión y recomendaciones.....	46
10. Bibliografía.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Necesidades básicas del uso de agua doméstico. Fuente: (OMS 2009, en Avila & Moreno, 2016)	15
Figura 2.Filtro de bioarena implementado en algunos hogares en Haití en el año 2006. Fuente: (Duque <i>et al.</i> , 2006).....	24
Figura 3.Filtro de olla cerámica. Fuente: (Halem <i>et al.</i> , 2009).	27
Figura 4.Filtro de olla cerámica comercia y análisis de agua filtrada. Fuente: página web Aqualogic.	28
Figura 5. Filtro de olla cerámica comercial de Ecofiltros S.A.S. Diseño del filtro plástico (izquierda), diseño del filtro metálico (derecha). fuente: página web Ecofiltros.	28
Figura 6. Filtro de membrana cerámica. Panel (a) membrana plana. Panel (b) olla cerámica. Panel (c) Vela. Fuente: Goswami & Pugazhenthí, (2020).	31
Figura 7.Filtro galleta. Fuente: Chaukura <i>et al.</i> , (2020).	32
Figura 8.Filtro de vela cerámica. Fuente: Pagina web de Pure Water.....	33
Figura 9.Filtro Lifestraw Family 1.0	35
Figura 10.Compuestos de cloro. Panel (a) biocloro. Panel (b) hipoclorito de calcio granular. Panel (c) hipoclorito de calcio en tabletas. Fuente: página web de Pure wáter.....	37
Figura 11. Dosificador lineal de cloro líquido. (1) tanque de almacenamiento de cloro de 1 L; (2) válvula de manguito de la fuente; (3) tanque de flotación. Fuente: (Powers <i>et al.</i> , 2021).....	38
Figura 12.Desinfección solar. Fuente: (McGuigan <i>et al.</i> , 2012).	39
Figura 13.Prototipo filtro en arena y membrana cerámica.	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas del agua potable establecidas en el Artículo N°2, Resolución 2115 de 2007	12
Tabla 2. Características Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana establecidas en el Artículo N°3, Resolución 2115 de 2007.....	13
Tabla 3. Características microbiológicas de agua potable, establecidas en el Artículo N°5, Resolución 2115 de 2007.	13
Tabla 4. Características de los medios filtrantes.	16
Tabla 5. Propiedades físicas de medios filtrantes.....	17
Tabla 6. Propiedades de los productos del cloro.	19
Tabla 7. Aplicaciones actuales y potenciales de las nano partículas de Ag antimicrobiano. 21	
Tabla 8. Efecto bactericida y remanente de desinfectantes comunes de agua.	22
Tabla 9. Resultado análisis de agua filtrada, Ecofiltros S.A.S.	28
Tabla 10. Propiedades del medio filtrante (arena).....	44
Tabla 11. Parámetros para el dimensionamiento de un filtro.	45

Resumen

La prevalencia de varias enfermedades que se transmiten por el agua y el aumento en la tasa de mortalidad de niños a causa del consumo de agua insalubre, reflejan la necesidad de un tratamiento previo al consumo. En las zonas rurales dispersas de Colombia sólo el 58,0% de la población cuenta con acceso a agua potable (DANE, 2018) mientras que, el 42,0% restante consume agua no potable, por lo que posiblemente se encuentren expuestos a enfermedades de origen hídrico. Dada la historia y la utilidad de los sistemas de filtración, se ha convertido en la alternativa de tratamiento más utilizada para abastecimiento en zonas rurales, por tanto, este artículo se centra en numerosos ejemplos de uso de tecnología de filtración, para la eliminación de microorganismos patógenos en la producción de agua potable en el punto uso / doméstica, evaluando variables como remoción de *E. coli*, Coliformes fecales, turbiedad, entre otras, explicando y analizando métodos desde la filtración convencional como la filtración en arena y ollas cerámicas hasta la utilización de tecnologías avanzadas como membranas poliméricas y cerámicas. Con el pasar de los años a esta tecnología se le han realizado diferentes modificaciones físicas y de materiales filtrantes como la antracita, arena silíceo, carbón activado, arcilla, entre otros, además, se explica las características de los diferentes medios filtrante como su porosidad y tamaño efectivo.

También se exponen los diferentes procesos de desinfección de agua, ya que es una de las medidas de salud pública más importante que se pueda tomar con el objetivo de impedir brotes y epidemias de enfermedades (OPS/OMS, 1995, como se citó en Gonzáles, Martín, & Rosario, 2015), dado que los sistemas de retención de partículas no remueven el 100,0% de microorganismos, el proceso de desinfección de agua se hace indispensable para la producción de agua potable. En este artículo se mencionan y explicar las ventajas, desventajas y el modo de uso de la cloración, desinfección por SODIS, radiación UV, ozono y plata coloidal, con el objetivo de evaluar cuál de los sistemas de desinfección mencionados es el más oportuno para su implementación en zonas rurales, teniendo en cuenta la accesibilidad, costo y manejo de cada alternativa. Por último, se propone un sistema de filtración híbrido que combina el método filtración lenta en arena y una membrana cerámica, seguido un proceso de cloración del agua para así obtener agua que cumpla con los estándares de la norma colombiana RAS

(2000), este prototipo queda en fase investigativa, faltando su fabricación y análisis de funcionamiento, microbiológico e hidráulico.

Finalmente se concluye que la alternativa de filtración más adecuada para las zonas rurales por sus múltiples cualidades es la filtración lenta en arenas con un proceso de desinfección con cloro (Cl) posterior, para así proporcionar agua de calidad, evitando la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua, mejorando a si la calidad de vida de las personas.

Palabras clave: Agua potable, Filtros domésticos, Sistema de abastecimiento de agua potable, Desinfección, materiales de filtración.

Abstract

The prevalence of several diseases transmitted by water and the increase in children's mortality rate due to unhealthy water consumption reflects the need for treatment before consumption. In Colombia, only 58, 0% of the dispersed rural areas have access to drinking water (DANE, 2018). The remaining 42,0% of the population consume non-drinking water, so they are possibly exposed to water-borne diseases. History has proved the advantage of filtration systems, which have become the most used alternative treatment to supply rural areas. Therefore, this article focuses on numerous examples of the filtration technologies used to eliminate pathogenic microorganisms in the production of drinking water at the domestic stage by evaluating many variables such as removal of *E. coli*, fecal coliforms, turbidity, among others, explaining and analyzing methods from conventional filtration such as sand filtration and ceramic pots to the use of advanced technologies such as polymeric and ceramic membranes. Over the years, this technology has undergone different physical and filter material modifications such as anthracite, siliceous sand, activated carbon, clay, and others; it also explains the different filter media characteristics such as their porosity and adequate size.

This article also discusses the different water disinfection processes since it is one of the most important public health measures that can be taken with the aim of preventing disease outbreaks and epidemics (PAHO / WHO, 1995, as cited in Gonzáles, Martín, & Rosario,

2015), knowing that particle retention systems do not remove 100,0% of microorganisms, the water disinfection process is essential to produce drinking water. This article mentions and explains the advantages, disadvantages, use of chlorination and disinfection by sodium, UV radiation, and colloidal silver. The aim is to evaluate which of the disinfection systems mentioned is the most appropriate for the implementation in rural areas, considering the accessibility, cost, and management of each alternative.

This article proposes a hybrid filtration system that combines the slow sand filtration method and a ceramic membrane, followed by a chlorination process that allows obtaining water that complies with standards regulated by the legislation RAS (2000) in Colombia. This prototype remains in the investigative phase, lacking manufacture and functional, microbiological, and hydraulic analysis. To conclude, for all the multiple qualities, the most suitable filtration alternative for rural areas is slow filtration in sands with a subsequent disinfection process with chlorine (Cl). This system will improve and impact people's quality of life by providing standing water and avoiding diseases' proliferation.

Finally, concluded that the most suitable filtration alternative for rural areas due to its multiple qualities is slow filtration in sands with a subsequent disinfection process with chlorine (Cl), to provide quality water, avoiding the proliferation of diseases transmitted by water, improving the quality of life of people.

Keywords: Drinking water, Domestic filters, Drinking water supply system, disinfection, filtering materials.

1. Introducción

En el año 2002 la Observación General 15 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, definió el derecho humano al agua como aquel que permite “*disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico*” (Dávila & García, 2017). En Colombia el acceso al agua segura y suficiente refleja un panorama de desigualdad social, ya que en las zonas rurales dispersas sólo el 58,0% de la población cuenta con acceso a este servicio (DANE, 2018) mientras que, el 42,0% restante consume agua no potable, por lo que posiblemente este expuestos a enfermedades de origen hídrico

En el año 2015, la Organización Mundial de la Salud (OMS) informó que, por cada 10 personas sin acceso al agua potable 8 de ellas habitan en zonas rurales (OMS & UNICEF, 2015), lo cual evidencia la problemática que se presenta en este sector y al mismo tiempo, expone la necesidad de buscar alternativas que puedan mejorar la calidad de vida de estas personas, lo cual aportaría al Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua limpia y saneamiento, y así lograr un mayor acceso universal y equitativo al agua potable para el año 2030 (Naciones Unidas, 2015).

En diversas zonas rurales se emplea el uso de aguas superficiales y/o subterránea como fuente de abastecimiento sin ningún tratamiento posterior, por lo cual es necesario la implementación de alternativas de sistemas de potabilización que provea agua de calidad para consumo humano. La utilización de plantas convencionales de potabilización se hace todo un reto en este tipo de zona por la distribución poblacional del territorio, pues generalmente la distancia entre viviendas es amplia aumentando los costos del proyecto, por lo cual se han evaluado alternativas poco convencionales con el objetivo de reducir espacios, costos y mantenimiento (Santiago, Brancho & Torres, 2013)

La filtración es una alternativa de tratamiento de agua cruda que se puede utilizar para uso doméstico, este método se caracteriza por tener un tamaño pequeño o mediano de manera que pueda adaptarse adecuadamente al espacio de una vivienda familiar, existen diferentes

sistemas de filtración tanto comerciales como artesanales de los cuales se hablará más adelante en profundidad. El uso de un proceso de filtración no es suficiente para el tratamiento de aguas crudas por lo cual, investigaciones realizadas por Mutemi, Hoko, & Makurira, (2020) y Jarrin, Ramos, & Matamoros, (2009), recomiendan el uso de un tratamiento de desinfección posterior a la filtración, el cual, actúa directamente inactivando a las bacterias y así finalmente, proporcionando agua potable a las comunidades que no cuentan con el servicio.

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión sobre sistemas de filtración y desinfección del agua, encaminados al mejoramiento del abastecimiento doméstico para zonas rurales.

2. Planteamiento del problema

En Colombia al menos 6,2 millones de personas reciben en sus casas agua no potable y 368.000 de ellos están expuestos a que ese líquido contenga altas concentraciones de bacterias fecales, virus, parásitos y elementos no biológicos, como minerales y sustancias químicas, causando en las poblaciones una variedad de enfermedades a causa del consumo de agua contaminada. Según datos de la Subdirección de Salud Pública de la Secretaría de Salud de Bogotá, 8 de cada 10 muertes de niños menores a un año tienen origen en enfermedades de origen hídrico (Fernández & Suarez, 2016).

En la zona rural de nuestro país, es donde más se evidencia la carencia de una cobertura adecuada de acueducto. Según el Instituto Nacional de Salud (INS) sólo el 15,1% de la población en zona rural utiliza agua en condiciones seguras para el consumo humano, el 43,6% consume agua baja en tratamiento o protección y el 23,3% consume agua cruda, es decir, captada directamente de las fuentes de agua sin ningún tipo de tratamiento previo (Jiménez, 2015). Estas cifras son similares a las presentadas por el DANE en el último censo en el país (DANE, 2018), las cuales evidenciaron que un 58,0% de la población colombiana que vive en zona rural consume agua no apta para consumo humano.

Uno de los principales obstáculos que tienen las administraciones municipales para poder ofrecer soluciones de potabilización a las comunidades rurales, es que estas se encuentran dispersas, en Colombia el 15,8% de la población vive en zona rural dispersa (DANE, 2018).

Lo anterior conlleva a buscar e implementar soluciones individuales de tratamientos de agua para consumo humano, que les permita a los habitantes de las zonas rurales dispersas obtener agua de buena calidad y así contribuir al mejoramiento de su calidad de vida.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Generar alternativas de sistemas de filtración de agua para el abastecimiento doméstico que puedan ser implementadas por la población de las zonas rurales con carencia de acceso al agua potable.

3.2. Objetivos específicos

- Comparar diferentes alternativas de sistemas de filtración y desinfección de agua enfocados a usuarios domésticos en zona rural.
- Plantear diferentes alternativas de diseño de sistemas de filtración y desinfección de agua para el uso doméstico.

4. Marco normativo

La Corte Constitucional de Colombia en el 2011 ratificó en la sentencia T-740 del 2011 el agua como derecho fundamental protegido por los derechos internacionales, teniendo una sobre connotación en el sistema jurídico colombiano, en primer lugar, la de derecho fundamental y en segundo como servicio público. El congreso de Colombia en 1994 decreto la ley 144 donde se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios, entendiéndose como estos al servicio de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural.

Por otra parte está el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (Ministerio de desarrollo económico, 2000) en el cual se establece los requisitos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos operativos que se utilicen en la prestación de los servicios públicos domiciliarios, luego el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo

territorial en la resolución 2115 del 2007, menciona las características, los instrumentos básicos y las frecuencias del sistema de control y vigilancia, para la calidad del agua para consumo humano en Colombia.

Finalmente, en el año 2010 el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, expidió una recopilación de un conjunto de alternativas aplicables en la zona rural colombiana, sobre tecnologías colectivas o individuales encaminadas a dar solución problemas de agua y saneamiento para el sector rural del país, esta recopilación es el Título J del Reglamento técnico RAS 2000.

4.1. Características del agua potable

El agua potable debe tener características físicas, químicas y microbiológicas específicas para consumo humano las cuales están estipuladas en la Resolución 2115 del 2007 (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial,2007) que señala las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo. Algunas de estas características son presentadas en la Tabla 1 y Tabla 2

Tabla 1. Características físicas del agua potable establecidas en el Artículo N°2, Resolución 2115 de 2007

Características físicas	Expresado como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de platino y cobalto (UPC)	15,0
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2,0

Fuente: Resolución 2115 de 2007, Artículo 2. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Tabla 2. Características Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana establecidas en el Artículo N°3, Resolución 2115 de 2007.

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre salud humana	Expresado como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono orgánico total	COT	5.0
Nitritos	NO ₂	0.1
Nitratos	NO ₃	10
Fluoruros	F	1.0

Fuente: Resolución 2115 de 2007, Artículo N°3. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

El análisis microbiológico son los procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos. En cuanto a las características microbiológicas (Tabla 3), ninguna muestra podrá contener la presencia del indicador de calidad *E. coli* y de ningún otro microorganismo en 100 cm³, independientemente del método usado (Ministerio de ambiente, 2007).

Tabla 3. Características microbiológicas de agua potable, establecidas en el Artículo N°5, Resolución 2115 de 2007.

Técnica utilizada	Coliformes Totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0,0 UFC/100,0 cm ³	0,0 UFC/100,0 cm ³
Enzima sustrato	< de 1 microorganismo en 100,0 cm ³	< de 1 microorganismo en 100,0 cm ³
Sustrato definido	0 microorganismo en 100,0 cm ³	0 microorganismo en 100,0 cm ³
Presencia-ausencia	Ausencia en 100,0 cm ³	Ausencia en 100,0 cm ³

Fuente: Resolución 2115 de 2007, Artículo N°5. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

5. Marco teórico sobre tratamientos de potabilización.

Los beneficios de una comunidad que cuenta con agua potable son innumerables, significa la disminución de enfermedades hídricas en la población, mejora la calidad de vida, suple necesidades básicas, combate la pobreza y en zonas rurales evita el desplazamiento de largas distancias para abastecerse de esta, la Organización Mundial de la Salud informa que una mujer en África y Asia se debe trasladar al menos 6 km para recolectar agua para su familia o comunidad (OMS, 2014).

Los sistemas de tratamiento de potabilización de agua son un conjunto de operaciones unitarias de tipo físicas y químicas, que tienen como objetivo la eliminación o reducción de material particulado, microorganismos y virus, dando, así como resultado agua con las características adecuadas para uso industrial y doméstico. Existen diferentes sistemas de tratamiento de potabilización, entre los cuales se mencionan principalmente la sedimentación, la coagulación - floculación, la filtración y la desinfección, siendo los dos últimos el tema central del presente trabajo.

5.1. Filtración

La filtración es una alternativa tecnológica, la cual consiste en la retención de partículas suspendidas en el líquido y bacterias a través de un medio poroso (Chulluncuy, 2011), este sistema es utilizado en plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y como una solución individual al problema de abastecimiento de agua en zonas donde se carece de este, por ejemplo, en las zonas rurales. La tecnología de filtración individual o doméstica es un sistema de tratamiento de agua potable a pequeña escala, la cual es utilizada en los hogares para suplir la necesidad de agua potable, ya que son de fácil instalación, uso y mantenimiento, por lo cual, se presenta como una solución para comunidades donde no cuentan con acceso a este servicio.

Las personas usan el agua para diferentes actividades en el hogar, alguna de estas tiene mayor prioridad como el consumo de agua y cocción de alimentos se consideran de primera necesidad, luego el lavado de ropa, pisos, entre otras. Cada uso adicional conlleva beneficios para la salud y de otro tipo, que pueden ser menos urgentes, algunos de estos usos son mostrados en la Figura 1. El consumo de agua se mide usualmente en litros por persona (per cápita) por día (Avila & Moreno, 2016).

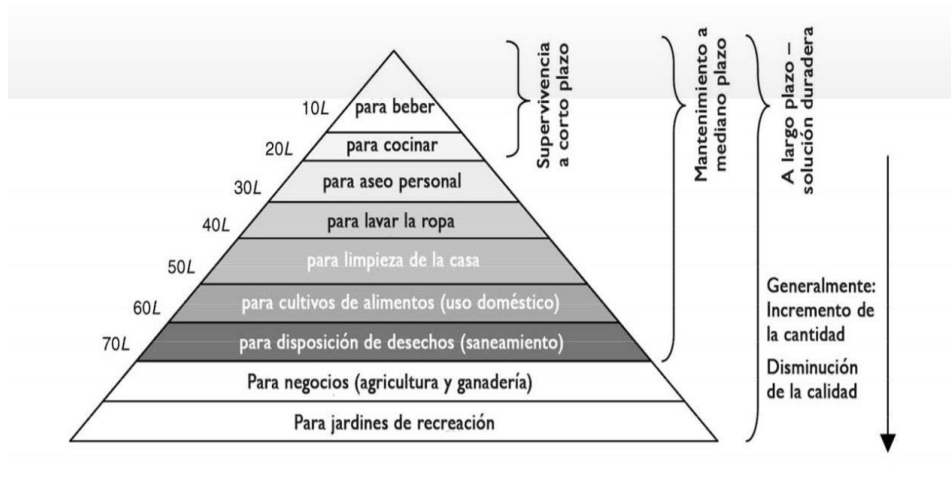


Figura 1. Necesidades básicas del uso de agua doméstico. Fuente: (OMS 2009, en Avila & Moreno, 2016)

En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos y tecnologías de filtración doméstica que pueden ser de lecho simple o de lecho mixto, en los cuales el lecho se refiere al material granular poroso por el cual el flujo de agua percola. El lecho mixto significa que el filtro contiene más de un medio poroso para la retención de partículas, por el contrario, el lecho simple sólo contiene un material filtrante. Los filtros domésticos más comunes utilizan lechos de membrana cerámica y lechos de arena, ofreciendo lograr procesos de retención de partículas que varían desde la osmosis inversa (retención de partículas menores a 0,002 μm) pasando por nanofiltración (0,020 μm a 0,001 μm), ultrafiltración (0,20 μm a 0,02 μm), hasta procesos de microfiltración 0,2 μm a 5,0 μm ; (Hernández, 1990). Estos filtros domésticos en su mayoría se ofrecen comercialmente asegurando obtener una eficiencia de remoción de turbiedad y de microorganismos patógenos hasta del 99,9% por lo que estarían cumpliendo así, lo establecido en la normatividad colombiana de agua para consumo humano, la cual establece 0 UFC/100 cm^3 según la Resolución 2115 del 2007 (Ministerio de ambiente, 2007).

5.1.1. Medios filtrantes

La selección del tipo de material filtrante se basa en las características del agua a tratar y en el uso que se le pretende dar al agua ya filtrada. Un medio filtrante ideal es aquel que requiere una cantidad mínima de agua para ser lavado específicamente y que sea capaz de remover la mayor cantidad posible de partículas suspendidas, dando como resultado un efluente de buena calidad (Aguiar & Portela, 2009). Algunos de los materiales más utilizados en la filtración son: la arena, la antracita, el carbón activado y las membranas cerámicas. En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestran las características y propiedades físicas de los principales medios filtrantes.

Tabla 4. Características de los medios filtrantes.

Material	Características
Arena	<ul style="list-style-type: none">• Su forma facilita la retención de sólidos suspendidos• Su funcionamiento y manejo es sencillo• Tamaño de partícula entre 0,0625 mm a 2,0 mm
Antracita	<ul style="list-style-type: none">• Contiene altas cantidades de carbón mineral• Su forma facilita la retención de sólidos suspendidos• Es menos densa que la arena• Baja pérdida de carga• Tamaño de partícula entre 0,80 mm a 1,10 mm
Carbón activado	<ul style="list-style-type: none">• Remueve olor y sabor• Los contaminantes orgánicos quedan retenidos en su superficie• Elimine el cloro residual libre• Tamaño de partícula 0,25 mm en polvo
Membrana cerámica	<ul style="list-style-type: none">• Tiene microporos lo que le permite retener partículas de tamaños más pequeños que otros materiales los cuales pueden variar entre 0,002 μm a 5,0 μm logrando procesos entre la osmosis inversa y la microfiltración

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5. Propiedades físicas de medios filtrantes.

Material	Características
Arena Sílice/ Cuarzita	<ul style="list-style-type: none"> • Dureza • Resistencia química • Insolubilidad en el agua
Antracita	<ul style="list-style-type: none"> • Color negro • Resistencia mecánica • Alto contenido de carbono () • Cristalina
Carbón activado	<ul style="list-style-type: none"> • Color negro • Agente absorbente • Área de superficie (1500 m²/g) • Insoluble en agua
Membrana polietersulfona (PES)	<ul style="list-style-type: none"> • Polímetro sintético • Color amarillo • Tonalidad translúcida

Fuente: Elaboración propia.

Un parámetro importante de evaluar antes de elegir un medio filtrante es determinar la tasa de filtración de este, ya que esta variable define de volumen de agua que filtrada respecto tiempo, por lo tanto, determina si un prototipo puede proporcionar una dotación de agua mínima para el abastecimiento de una familia.

5.2. Desinfección

La desinfección de los sistemas de abastecimiento de agua es una de las medidas de salud pública más importante que se pueda tomar con el objetivo de impedir brotes y epidemias de enfermedades (OPS/OMS,1995, en Gonzáles, Martín, & Rosario,2015), siendo este un proceso que proporciona eliminación (muerte) de microorganismos patógenos mejorando la calidad del agua.

Después de pasar el agua por un sistema de tratamiento es esencial la implementación del proceso de desinfección, ya que ningún tratamiento de agua potable elimina el 100% de

microorganismos y virus. Existen diversos métodos de desinfección como: la ozonificación, la radiación UV, la cloración, la desinfección solar (SODIS, por sus siglas en inglés) y plata coloidal (Ag)

5.2.1. Ozonificación

El ozono (O_3) es un gas fuertemente oxidante e inestable, el cual influye en la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos, reduciendo parámetros físicos del agua como olor, sabor, color y turbidez. Es una alternativa de desinfección utilizada a gran escala en sistemas de tratamiento de agua potable, ya que, es muy efectivo a bajas concentraciones, no produce compuestos halogenados y tiene mayor efecto bactericida que el cloro (Sawyer *et al.*, 2000).

Este bactericida tiene una vida media en el agua entre 20 y 30 min, por lo tanto, no genera agentes residuales de larga duración. Como ya se mencionó anteriormente es un gas inestable por lo cual no es utilizado en sistemas de tratamiento descentralizados, por la complejidad y riesgo de su manipulación (Martínez & Cubides, 2018).

5.2.2. Radiación ultravioleta (UV)

El método de desinfección de agua a partir de radiación ultravioleta consiste en utilizar el espectro del rango de luz ultravioleta específicamente el UV-C, en el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre el material genético de los microorganismos y los virus, y los inactiva sin producir cambios físicos o químicos en el agua, además, cuando esta penetra la pared celular del microorganismo, erradica la acción de reproducción de la célula (Acosta, Caro & Perico, 2015).

Existen diferentes tipos de radiación ultravioleta entre las que están: la radiación de región la UV-A (315,0 a 400,0 nm) es usada para las lámparas de bronceado, la UV-B (280,0 a 315,0 nm) y la UV-C (200,0 a 280,0 nm), las UV-B y UC-C son las que contienen las longitudes de onda más efectivas para la acción germicida y ha sido demostrado que la longitud de onda óptima utilizada como desinfectante es de 254,0 nm (Trojan Engineering, 1994).

Esta alternativa tiene ventajas como la seguridad, diseño flexible y la no formación de subproductos de desinfección, posicionándolo como una excelente opción para el tratamiento

de aguas, sin embargo, por la poca accesibilidad y asequibilidad de lámparas ultravioletas, esta alternativa no es generalmente utilizada en zonas rurales para abastecimiento doméstico.

5.2.3. Cloración

El uso de cloro es el mecanismo más aplicado en los sistemas de abastecimiento, su implementación ayudo al incremento de la esperanza de vida en los países desarrollados (Solsona & Méndez, 2002). En la Tabla 6 se muestran las principales propiedades del cloro y sus variedades.

La eficiencia del sistema, según Botero (2020) de desinfección depende de dos variables importantes, el tiempo de contacto, el cuales el tiempo disponible para que el cloro actúe sobre los microorganismos, este tiempo debe ser como mínimo de 10 a 15 min en agua potable, normalmente entre 15 y 30 min, sin embargo la normativa colombiana determina un tiempo mínimo de contacto de 20 min (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, Resolución 330, artículo 121 párrafo 2,2017), también la concentración de desinfectante a utilizar, pero esta depende de la calidad del afluente para su determinación se necesitan prueba de laboratorio (Li *et al.*, 2017).

Tabla 6. Propiedades de los productos del cloro.

Nombre y formula	Nombre comercial o común	Características	% Cloro activo	Estabilidad en el tiempo	Seguridad	Envase usual
Cloro gas Cl_2	Cloro licuado Cloro gaseoso	Gas licuado a presión	99,5%	Muy buena	Gas altamente tóxico	Cilindros de 40,0 a 70,0 Kg. Recipientes de 1,0 a 5,0 toneladas
Cal clorada $\text{CaO} \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cal clorada, polvo blanqueador, hipoclorito de cal, cloruro de cal	Polvo blanco seco	15,0 a 35,0 %	Media. Se deteriora rápidamente cuando se expone a temperatura alta, humedad y/o luz solar.	Corrosivo	Latas de 1,5 Hg. tambores de 45,0-135,0 Kg, bolsas plásticas o de papel de 25,0-

Nombre y fórmula	Nombre comercial o común	Características	% Cloro activo	Estabilidad en el tiempo	Seguridad	Envase usual
				Perdida de 1,0% al mes		40,0 Kg, otros.
Hipoclorito de sodio NaClO	Hipoclorito de sodio, blanqueador líquido, lejía, agua lavandina, agua sanitaria	Solución líquida amarillenta	1,0 a 15,0 % como máximo. Concentraciones mayores a 10,0% con inestables	Baja. Perdida de ,2,0 a 4,0 % por mes; mayor si la temperatura excede los 30°C	Corrosivo	Diversos tamaños de botellas de plástico y vidrio, y garrafones
	Hipoclorito de sodio por electrólisis <i>in situ</i>	Solución líquida amarillenta	0,1 a 0,6 %	Baja	Oxidante	Cualquier volumen
Hipoclorito de calcio Ca(ClO)₂ .4H₂O	HTH Perclorón	Polvo, gránulos y tabletas. Sólido y blanco	Polvo 20,0 a 35,0% granulado lado: 65,0 a 70,0% tabletas: 65,0 a 70,0%	Buena. Perdida de 2 a 2,5 por año	Corrosivo Inflamación posible al entrar en contacto con ciertos materiales ácidos.	Latas de 1,5 Kg. Tambores 45,0-135,0 Kg. Baldes de plástico.

Fuente: Solsona & Méndez, (2002)

Una de las desventajas del uso del cloro como desinfectante es la formación de subproductos como las cloraminas, por lo cual se han buscados diferentes alternativas a este método. Una de estas alternativas es la desinfección por radiación ultravioleta (UV).

5.2.4. Desinfección solar

La desinfección solar del agua (SODIS) es un método económico, simple y sostenible, el cual consiste en la exposición solar directa del agua en botellas transparentes, basada en el efecto nocivo de la radiación UV y su sinergia con la temperatura sobre organismos patógenos (Joyce *et al.*, 1996). Los siguientes factores se consideran que tiene alta incidencia en la efectividad del proceso de desinfección solar (Márquez-Bravo, 1998):

- La intensidad de la luz solar y el tiempo de exposición depende de la localización geográfica (latitud), variaciones estacionales, nubes, el rango efectivo de longitudes de onda de la luz y la hora.
- La clase de bacterias expuestas, la naturaleza y composición del medio y la presencia de nutrientes capaces de soportar el crecimiento y la multiplicación de los microorganismos.
- El tipo y las características de los recipientes (color, forma, tamaño, grosor y transparencia a la luz del sol)
- El grado de turbidez, volumen y profundidad del agua

5.2.5. Plata coloidal

Otra alternativa para la sustitución de desinfectantes químicos es la utilización de nano partículas de plata (Ag) las cuales previenen la replicación de ADN y afecta la estructura y permeabilidad de la membrana celular de los microorganismos presentes en el agua. Las nano partículas de plata de tamaño menor a 10 nm son más tóxicas e inhiben virus presentes (Li *et al.*, 2008), mejorando considerablemente las características microbiológicas del agua. en la Tabla 7 se puede observar las diferentes aplicaciones actuales y futuras de la plata coloidal.

Tabla 7. Aplicaciones actuales y potenciales de las nano partículas de Ag antimicrobiano.

Nano material	Mecanismo antimicrobiano	Aplicaciones actuales	Aplicaciones futuras
n Ag	Liberación de iones Ag ⁺ , alteración de la membrana celular y transporte de electrones, daño al ADN	Filtros de agua portátiles, ropa, dispositivos médicos, revestimientos para lavadoras, refrigeradores y recipientes para alimentos	Recubrimientos superficiales, membranas

Fuente: (Li et al., 2008)

Finalmente, en la Tabla 8 se presenta el *poder* bactericida y efecto remanente de algunos tipos de desinfectantes, se observa que el ozono presenta un poder bactericida superior a los

clorados sin embargo el ozono no provee un efecto remanente en el agua y los bactericidas clorados sí.

Tabla 8. Efecto bactericida y remanente de desinfectantes comunes de agua.

Tipo	Efecto Bactericida	Efecto Remanente
O₃	+++	0
Cl₂	++	+
CLO₂	++	+
Cloraminas	+	++
UV	++	0
SODIS	+	0

(+) efecto positivo. (0) Efecto neutro. Fuente: Guimarães et al., (s.f)

6. Estado del arte

6.1. Filtración

La filtración es una alternativa de tratamiento del agua, es un proceso físico a gravedad que consiste en pasar el agua por medio de material granular o poroso con el fin de retener bacterias y partículas suspendidas en el agua (Ministerio de ambientes, vivienda y desarrollo territorial, 2010), funcionado exitosamente en sistemas colectivos de potabilización, Por lo cual, se ha evaluado diferentes modificaciones de esta alternativa con el fin de optimizarlo para el abastecimiento doméstico de las comunidades, para este método se utilizan diversos medios filtrantes y la combinación de ellos como la antracita, arena silíceas, carbón activado, membranas, entre otros.

Un ejemplo de lo mencionado anteriormente, es el filtro de bioarena, el cual es un sistema de filtración conformado por arena de diferentes granulometrías y consiste en la implementación de distintos mecanismos de remoción, como el atrapamiento mecánico que se da por medio de los poros generados por los granos de arena, absorción del material suspendido y por último la formación de una capa biológica en los primeros 5,0 a 8,0 cm de arena mejorando la eliminación de bacterias y parásitos, esto último es lo que lo diferencia de un filtro de arena convencional, además tiene la opción de funcionar de manera intermitente, construirse a menor escala para el abastecimiento individual de diferentes poblaciones que no cuenten con un sistema de suministro de agua potable (Torres et al., 2017)

Generalmente para el diseño y construcción de un sistema de filtración en arena, se utiliza una arena especial para esta función, por ejemplo, la arena sílice o también llamada arena cuarzica es la combinación de sílice y oxígeno con propiedades de: alta dureza, resistencia química, alto punto de fusión y ser insoluble en agua, este medio filtrante debe estar libre de arcillas, polvo, calcio, hierro, magnesio, manganeso y materia orgánica o micéica para ser utilizada como medio de filtración de agua potable ya que no debe contener ningún elemento que sume o proporcione contaminación (Secretaría de Economía, 2018) sus aplicaciones en esta industria son en filtración de agua potable, filtración terciaria de agua residual, filtros de lecho profundo, filtros de arena, filtros de tratamiento de agua industriales. El tamaño efectivo de la arena cuarzica varía según la necesidad 0,4 a 0,6 mm y su coeficiente de uniformidad esta entre 1,6 y 1,7 (Antioquena de arenas, 2013).

Aguiar & Portela (2009) afirmaron en su trabajo que un filtro de lecho simple en arena puede eliminar entre el 90,0% y el 99,9% de bacterias, 100.0% de helmintos y el 99.0% de virus y protozoos, además, determinaron que para el diseño, la construcción y el uso de un filtro de bioarena es necesario considerar diferentes variables para un buen funcionamiento de la unidad; por ejemplo, el nivel de agua por encima del medio filtrante, ya que un exceso de éste podría impedir el ingreso de oxígeno al medio filtrante y volver el sistema anaerobio, afectando directamente a los microorganismos aerobios de la biocapa del filtro. Igualmente, Aguiar & Portela (2009) evaluaron el efecto de la limpieza de la arena. Ellos encontraron que la limpieza influía en el funcionamiento del filtro y que es importante realizarla ya que con el pasar del tiempo los poros del medio filtrante se colmatan disminuyendo así, la eficiencia. Por esto concluyeron que es necesario realizar la limpieza del filtro preferiblemente por retrolavado (lavado del filtro a contraflujo) con una presión entre 1,0 y 2,0 psi y no realizar el retrolavado con una presión mayor para así evitar el levantamiento del material granular.

La alternativa de filtración de bioarena fue analizada en un estudio realizado durante más de dos años en hogares de una población en Haití (Duque *et al.*, 2006). Durante el estudio se le proporcionó filtros de lecho mixto a esta comunidad, cuyo material filtrante consistió en una capa de arena fina y otra capa de arena gruesa y una capa de grava como medio de soporte. Las medidas del filtro fueron de 95,0 cm de alto y 36,0 cm de ancho con un recubrimiento

en hormigón, además cuenta con una placa difusora que distribuye de forma homogénea el afluente para comenzar el proceso de filtrado (Figura 2).

El estudio de Duque *et al.*, (2006) dio como resultado que la configuración removió el 98,5% de *E. coli* y proporcionó un caudal de 30,0 a 40,0 L/h, dentro de esta investigación se analizaron muestras de agua directamente después de ser filtrada y de agua filtrada almacenada y se encontró que, cuando la comunidad almacena el agua después de pasar por el proceso de filtración esta se recontamina dando valores de *E. coli* mayores a 10,0 UFC/100 ml siendo este valor 7 veces mayor a las muestras tomadas directamente del prototipo, por lo cual, se recomendó la desinfección del agua como tratamiento secundario para asegurar el consumo de agua segura en todo momento. Además, se realizó una visita a los hogares después de dos años y se encontró que la mayoría de los filtros seguían en buen funcionamiento.



Figura 2. Filtro de bioarena implementado en algunos hogares en Haití en el año 2006. Fuente: (Duque et al., 2006)

El estudio de Duque *et al.*, (2006) dio como resultado remociones de microorganismos mayores al 90,0% en los filtros instalados en la comunidad. Por el contrario Mutemi, Hoko, & Makurira, (2020) señalo que los filtros montados en laboratorios daban resultados de remoción entre el 93,0 y 99,0%, en cambio los filtros instalados en campo (comunidades) su eficiencia variaba entre 60,0 y 99,9% evaluando los mismos organismos indicadores, siendo estos resultados variables y diferentes, por lo cual, modifíco el diseño adicionando un capa reactiva que contiene hierro elemental (Fe) como agente desinfectante metálico, con el objetivo de aumentar de manera significativa el rendimiento de los prototipos. Después de

realizar los respectivos análisis encontraron que la mezcla de hierro con arena aumentó significativamente la remoción de coliformes fecales dando valores entre los 99,2 y 99,5 % en comparación al filtro lento en arena que removió el 94,8%, además determinaron que los valores de hierro en el efluente del agua fueron menores a 0,3 mg/L estando en el rango permitido por la organización mundial de salud (Organización Mundial de la Salud, 2011).

En la literatura se encuentran diferentes artículos donde se evalúa el tiempo de crecimiento de la biocapa en la arena como medio filtrante. La Universidad Nacional de Ingeniería de Managua (Nicaragua), estableció que el crecimiento de la biocapa en un medio filtrante de arena se demoró 31 días usando agua tomada de un pozo. Para definir este lapso de tiempo utilizaron como variable control la turbiedad para realizar el seguimiento a la formación de la capa biológica (Rivas, Flores, & Ramírez, 2014). Sin embargo, FC. Andreoli & L, (2020), determinaron que alimentar un filtro de bioarena de agua subterránea con agua de río disminuiría el tiempo de maduración de la biocapa en un 20,0%, concluyendo que la concentración de nutrientes es fundamental para la formación y maduración de esta capa. Fritiani *et al.*, (2020), realizaron un estudio donde se determinó la concentración ideal de nutrientes que debe tener el agua que alimente un filtro de bioarena para obtener un tiempo mínimo de maduración de la capa biológica y llegaron a la conclusión que la concentración más efectiva de carbono, nitrógeno y fósforo (C: N: P) es de 85,0:5,6:1,2 respectivamente, ya que los análisis al sexto día arrojaron remoción de *E. coli* superiores al 98,0% , es decir, al sexto día de funcionamiento el filtro ya tenía una capa biológica lo suficientemente madura para aportar en la remoción de patógenos.

Así mismo, Torres *et al.*, (2017), publicaron un artículo llamado “*Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración*” en el cual se evaluó la eficiencia en remoción de la turbiedad y de la *E. coli* de un filtro de lecho mixto, el cual constaba de arena de diferentes granulometrías como material predominante, carbón activado y piedra pómez ya que tienen alto porcentaje de adsorción y por último una capa de gravilla como medio de soporte, este prototipo filtraba agua ya con procesos previos, es decir, agua floculada previamente. El sistema en general tuvo medidas de alto 176,0 cm y de ancho 35,0 cm, lo que hizo al prototipo poco práctico para el abastecimiento doméstico ya que necesitó gran cantidad de área para su instalación, estos materiales eran de fácil acceso a nivel local.

Adicional, en la parte superior de la estructura, añadieron un mezclador de aspas con el fin de mejorar la unión de flóculos y así generar un impacto positivo en la sedimentación de partículas, después de analizar las muestras filtradas se encontró que esta configuración de filtro proporcionó un caudal de 1,5 L/ min y removió el 99.9 % de *E. coli* y el 98,0% de turbiedad, proporcionando agua segura y de calidad.

El proyecto Semilla, desarrollado en Ecuador, tuvo como finalidad evaluar la eficiencia de dos sistemas de filtración para depuración de agua, un filtro lento en arena y un filtro cerámico en arcilla para su posterior implementación en zonas rurales del país. La evaluación de la filtración lenta constó de 2 prototipos: uno tradicional y uno modificado, para determinar con cuál de los dos se obtenía mejores porcentajes de remoción de microorganismos. El prototipo tradicional contenía arena de diferentes granulometrías, grava y gravilla y el modificado contenía, lo anteriormente mencionado, más una capa de zeolita. Después de 15 días de observación y análisis fisicoquímicos los autores determinaron que la alternativa de filtración lenta en arena no removió el 99,9% de los microorganismos como otros autores han afirmado, sino que removió el 74,6% de coliformes fecales y el 80,8% de *E. coli*. Con el prototipo modificado con zeolita y con el cual se esperaba que diera valores de remoción altos, se obtuvo una remoción de 61,6% de coliformes fecales y del 79,3% de *E. coli*, dejando como conclusión que ambos prototipos necesitan de un tratamiento secundario para brindar agua segura para consumo (Jarrin, Ramos, & Matamoros, 2009).

En el mismo proyecto Semilla, desarrollado en Ecuador, se evaluó además, el filtro cerámico en arcilla, el cual consistía de arcilla y un contenido de materia orgánica entre el 20,0 % y 30, 0%, este prototipo sencillo y de fácil construcción arrojó resultados poco alentadores, ya que se evidenció un aumento en la concentración de coliformes fecales que pudo deberse a un crecimiento microbiológico en el material filtrante, además la remoción de *E. coli* fue de 86,1% la cual no fue suficiente para catalogar el agua filtrada como agua segura, por lo cual nuevamente los autores recomendaron un tratamiento secundario y la cloración (o desinfección) del agua antes de consumirla (Jarrin, Ramos, & Matamoros, 2009).

Los filtros de olla cerámica son una tecnología basada en prácticas precoloniales americanas, fabricados con materiales locales y rentables para uso como sistema de tratamiento de agua como solución individual. Esta alternativa ha sido utilizada por años para el abastecimiento

de comunidades, pero al pasar el tiempo se le han realizado estudios y modificaciones con el objetivo de mejorar su eficiencia de remoción de microorganismos y para evitar la propagación de enfermedades hídricas.

Un estudio realizado en la universidad tecnológica de Delft evaluó la sostenibilidad de un sistema de tratamiento de agua potable en el hogar con un filtro de olla cerámica impregnado con plata coloidal, basados en 5 criterios fundamentales, los cuales son accesibilidad, calidad de agua, producción de agua, funcionalidad y huella ambiental (Halem *et al.*, 2009). En la Figura 3 se muestra como es el sistema del filtro de olla cerámica.

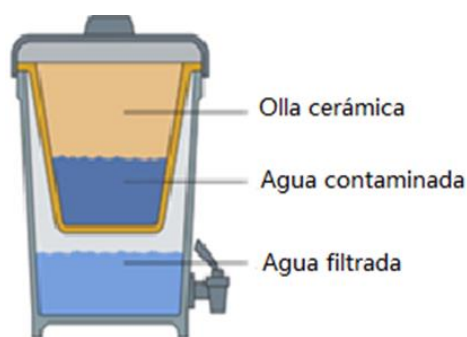


Figura 3. Filtro de olla cerámica. Fuente: (Halem *et al.*, 2009).

El filtro fue hecho a base de arcilla y aserrín dando como resultado remociones de *E. coli* de Log (10) de 2 a 3 proporcionando agua de calidad excelente con un caudal de 1,0 a 3,0 L/h, además, evaluaron la lixiviación de plata coloidal para determinar si esta podría causar problemas de salud, y encontraron en el afluente valores por debajo de los límites establecidos por la OMS de 100,0 $\mu\text{g/L}$, gracias a este valor también determinaron que la eficiencia del filtro disminuiría progresivamente, por lo cual definieron que el prototipo tendrá una vida útil entre 1- 2 años en los cuales proporcionará agua apta para consumo humano (Halem *et al.*, 2009).

En relación con este tema, algunas empresas como Aqualogic S.A.S (Colombia) y Ecofiltro S.A (Guatemala), han diseñado, fabricado y distribuido, filtros cerámicos para el abastecimiento individual de poblaciones urbanas y rurales. Estos filtros consisten en una olla cerámica en arcilla (Figura 4) con un tamaño de poro entre 0,2 μm y 0,5 μm , una capa de carbón activado y plata coloidal como agente desinfectante, este sistema proporciona un caudal de 1,5 a 2,0 L/h y una eficiencia en remoción de coliformes totales y *E. coli*, según

sus fabricantes, del 99,9%. Estos filtros cuentan con una vida útil de 2 años en los cuales proporcionaría agua de buena calidad para consumo humano. En el caso de Aqualogic S.A.S, sólo se encontró una publicación en sus redes sociales del año 2019, en donde se obtiene por métodos cualitativos resultados de ausencia de coliformes totales y ausencia de *E. coli*, lo cual no permite calcular un porcentaje de eficiencia de remoción, mientras que, para la empresa Ecofiltros S.A. sí se encontró una publicación en su página web donde se evidencia la remoción de *E. coli* del 99,9% (Tabla 9).



PARÁMETRO	MUESTRA ANTES DE FILTRAR	MUESTRA DESPUÉS DE FILTRADA
COLIFORMES TOTALES	$4,6 \times 10^4$ UFC/100mL	AUSENCIA
E.COLI.	$4,6 \times 10^4$ UFC/100mL	AUSENCIA
TURBIEDAD	64.7 UNT	0.878 UNT
COLORO	1,1 mg/L CL_2	<0,1 mg/L CL_2 *

Figura 4. Filtro de olla cerámica comercial y análisis de agua filtrada. Fuente: página web Aqualogic.



Figura 5. Filtro de olla cerámica comercial de Ecofiltros S.A.S. Diseño del filtro plástico (izquierda), diseño del filtro metálico (derecha). fuente: página web Ecofiltros.

Tabla 9. Resultado análisis de agua filtrada, Ecofiltros S.A.S.

Parámetro	Agua antes de filtrar	Agua después de filtrar	Porcentaje de efectividad
Sólidos disueltos	139,0	1,8	95,6
<i>E. coli</i>	>2419,6	<0,01	99,9

Turbiedad	76,0	15,0	80,3
------------------	------	------	------

Fuente: Pagina web de Ecofiltros S.A.S

Aunque la plata coloidal le aporta un poder desinfectante al filtro de arcilla, el material cerámico también cumple un papel fundamental en el proceso, por esto es importante conocer las propiedades del material a utilizar ya que no toda cerámica proporciona la misma eficiencia en eliminación de microorganismos. En Nigeria los ingenieros Akosilea *et al.*, (2019) realizaron un estudio donde construyeron filtros cerámicos impregnados de plata coloidal a escala de laboratorio, con arcillas recolectadas de diferentes ciudades de Nigeria y utilizando no solo diferentes arcillas si no también, distintas proporciones entre arcilla y aserrín para la generación de los filtros, después de varias pruebas encontraron que la arcilla odo Igbara (tipo de arcilla disponible en Nigeria) dio los mejores resultados en eliminación de *E. coli* y coliformes fecales los cuales fueron 100,0% y 80,0% respectivamente, con un porcentaje de arcilla de 50% y de aserrín del 50,0%, estos análisis microbiológicos se efectuaron por el método de recuento de placa, adicional a la remoción microbiológica también se reportó un caudal efluente de 1,9 L/h .

El porcentaje de aserrín que se usa junto a la arcilla en la creación de los filtros, es otra variable a considerar ya que este afecta adversamente la capacidad de absorción de agua y la resistencia de la mezcla, por lo tanto, Akosilea *et al.*, (2019) determinaron que a mayor porcentaje de aserrín mayor será la tasa de absorción de agua del filtro debido a la alta porosidad del material y finalmente establecieron que el porcentaje de aserrín no debe ser menor al 30,0% y menor al 70,0% para la obtención de un filtro funcional y eficiente.

Por otra parte, existen filtros de alto flujo, los cuales contienen grandes porcentajes de material de quema, el cual puede ser aserrín, cáscara de coco, almidón entre otros, esto con el objetivo de aumentar la porosidad del filtro y así mismo la tasa de filtración. Halem *et al.*, (2017) realizaron una investigación donde pusieron a prueba un filtro cerámico con diferentes cantidades de cáscara de coco (11,0 a 14,0) Kg aumentando la porosidad del elemento filtrante y compararon su rendimiento con un filtro convencional de igual tamaño y encontraron que el filtro convencional filtraba a una tasa de 3,6 L/h y el de alta tasa entre (6,0 y 19,0) L/h dependiendo del contenido de material de quema que contenga el recipiente, además, estudiaron si esta condición disminuye la eficiencia de remoción de patógenos y

hallaron que inicialmente el filtro convencional daba mejores resultados de eliminación de microorganismos pero que al pasar el tiempo ambos filtros se empezaron a obstruir por el material particulado y esta obstrucción en los filtros de alto flujo hizo que la remoción de microorganismos superará el rendimiento de los filtros normales, esto gracias a que se generó en una biocapa en ambos filtros pero en el convencional debió ser removida ya que está hacía que la tasa de filtración disminuyera por debajo de 1,0 L/h. Por el contrario, en el filtro de alta tasa está generó beneficios en remoción sin disminuir drásticamente su tasa de flujo, finalmente concluyeron que a pesar de que los filtros regulares se desempeñan inicialmente mejor, después de la obstrucción, el filtro de alto flujo presentaba una tasa de filtración superior, así como una mayor remoción de *E. coli* siendo este mejor para su implementación en hogares.

Un artículo publicado en julio del 2020 por investigadores colombianos llamado *A novel filtration system based on ceramic silver-impregnated pot filter combined with adsorption processes to remove waterborne bacteria*, evaluó la efectividad de un filtro cerámico impregnado con plata coloidal (filtro 1) y un filtro cerámico impregnado con plata coloidal y que además contiene carbón activado y zeolita (filtro 2), con el objetivo de determinar cuál de los 2 proporciona mejor eficiencia en remoción *E. coli*, la cerámica es arcilla roja y cáscara de coco para proporcionar porosidad a la estructura, la concentración de plata para ambos filtros fue la misma de 500 ppm (Rivera *et al.*, 2020). Este estudio duró 135 días en los cuales se realizaron análisis microbiológicos constantemente y los resultados determinaron que el filtro 1 removió entre el 98,0% y el 99,9% *E. coli* y el filtro 2 removió entre el 99,0% y 99,9% dando este mejor rango de efectividad, pero no lo suficiente para justificar la inversión de los materiales como el carbón activado o la zeolita, por lo que concluyeron que por economía y rendimiento el filtro (1) sería apropiado para comunidades vulnerables, además, resaltaron que como la remoción no fue del 100,0% el agua filtrada no cumple con las normas colombianas de agua potable donde se exige que la concentración de *E. coli* en el agua debe ser de 0,0mg/L. La lixiviación de plata coloidal también fue evaluada y encontraron que esta es inferior a 0,01 mg/L lo que sugiere que la plata tiene baja movilidad, descartando posibles complicaciones a la salud por su consumo frecuente (Rivera *et al.*, 2020).

La cerámica es un material muy utilizado en forma de olla para el tratamiento de agua cruda en comunidades rurales como ya se mencionó, pero no solamente existe esa modificación del material, con el tiempo se han realizado modificaciones a este diseño, incluso están recubriendo la cerámica con distintos materiales con el fin de mejorar las propiedades superficiales de este y así satisfacer la necesidad de consumir agua de mejor calidad a menor escala. En la Figura 6 se puede apreciar las formas más utilizadas de filtros de membrana cerámicas.



Figura 6. Filtro de membrana cerámica. Panel (a) membrana plana. Panel (b) olla cerámica. Panel (c) Vela. Fuente: Goswami & Pµgazhenthī, (2020).

Zhao *et al.*, (2020), realizaron una investigación en la cual construyeron un filtro cerámico a base de arcilla (<2,0 mm) y cáscara de coco (0,07-0,20 mm) en forma de disco, con dimensiones de 10,0 cm de diámetro y 1,0 cm de espesor, además, pintado con hierro (Fe) y dióxido de titanio (TiO₂) como agentes bactericidas. El hierro es un elemento químico que contribuye a la eliminación de *E. coli* y el compuesto nano-TiO₂ es un material semiconductor de propiedades fotocatalítica y bactericida, que unidos podrían ayudar a la desinfección del agua filtrada por el disco. Los resultados arrojados por este estudio determinaron que el filtro de disco modificado reduce en un 99,9% la *E. coli* y proporciona una tasa de filtración de 119,0 ml/h. Este tipo de filtros son convencionalmente utilizados para superficies pequeñas como grifos o filtros fabricados para emergencia ambientales.

Los filtros planos cerámicos han sido objeto de diferentes investigaciones, dada la facilidad de construcción, la economía de sus materias y la versatilidad a la hora de emplearlos en diferentes sistemas de tratamiento de agua. Chaukura *et al.*, (2020), hicieron un filtro en forma de galleta, es decir, pusieron un filtro plano cerámico luego una capa de biocarbón y luego otro filtro plano cerámico formando una galleta, con el objetivo de identificar si esta

modificación conlleva a eficiencias de remoción y tasas de filtración más altas que un filtro convencional, en esta investigación se evaluaron parámetros como dureza total, sólidos disueltos totales y turbiedad. Para mayor claridad la Figura 7 nos muestra como está conformado el filtro galleta.

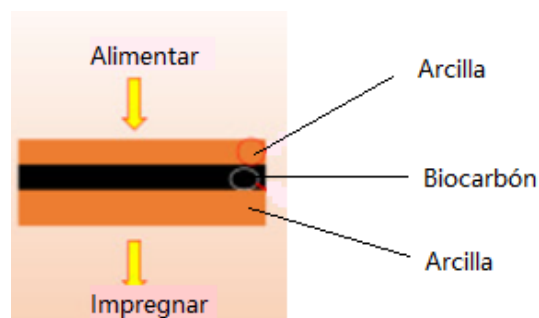


Figura 7. Filtro galleta. Fuente: Chaukura et al., (2020).

La cerámica fue hecha a base de arcilla en 83,0% y aserrín en 17,0% como agente porógeno, este diseño lo compararon con un filtro hecho solamente a base de arcilla y agua, luego de poner ambos sistemas en funcionamiento y realizar estudios a los efluentes, encontraron que el filtro galleta tuvo una remoción de dureza total del 42,5%, de sólidos suspendidos totales del 45,8% y de turbiedad del 67,0% mientras que, el filtro convencional obtuvo resultados del 14,8%, 17,6%, 56,0% respectivamente, evidenciando una notoria diferencia en los resultados de ambos filtros, además, las tasas de filtración para el filtro galleta fue de 3,1 L/h y el filtro tradicional 2,0 L/h ratificando la importancia para el sistema contener el agente porógeno que le proporcione características de alta capacidad de filtración al sistema, así mismo da resultados satisfactorios para la idea innovadora del filtro galleta ya que proporciona agua de mejor calidad.

Como ya se mencionó anteriormente, existe un tipo de modificación de este material que tiene forma de vela cerámica, este modelo ha sido comercializado por algunas empresas por proporcionar excelentes resultados en cuanto a depuración de aguas crudas, por ejemplo, la empresa Pure Water tiene en su portafolio un filtro familiar (Figura 8) para el abastecimiento individual, este sistema consta de una vela cerámica la cual retiene partículas con tamaños entre 0,5 a 1,0 μm , una capa de plata coloidal que elimina el 99,0% de las bacterias y carbón

activado para la eliminación de malos olores y sabores, este producto proporciona hasta 0,8 L/h suministrando a una familia agua 100,0% segura.



Figura 8. Filtro de vela cerámica. Fuente: Pagina web de Pure Water.

Pérez, Días, & González, (2014), evaluó la reducción de turbiedad y *E. coli* en un filtro de vela cerámica revestida en su interior por plata coloidal y carbón activado y otro filtro con 2 de esas velas de este mismo tipo, con el objetivo de determinar si la utilización de 2 velas aumentaría drásticamente el rendimiento y eficiencia. El estudio tuvo un tiempo de duración de 6 meses en los cuales a ambos sistemas se les añadió un volumen diario de 7,5 L/ filtro, los cuales dieron como resultado que ambos prototipos filtran el 99,0% de turbiedad bajándola a valores inferiores a 2,0 NTU cumpliendo con la normativa colombiana, Resolución 2115 del 2007 y entre 99,9 al 100,0 % de *E. coli* disminuyendo entre 5 y 3 unidades logarítmicas su presencia en el agua. Esta investigación afirmó que la tasa de filtración depende del taponamiento de los poros, como ya se mencionó anteriormente, y de la carga hidráulica sobre la vela (lámina de agua), a ambos filtros se le realizó limpieza diaria pero la tasa de filtración seguía disminuyendo para el filtro de una vela su tasa de filtración fue de 0,4 L/h y para el de dos velas 0,8 L/h a partir del día 30 de operación, lo que nos indica qué se puede presentar obstrucciones irreversible, dado que la limpieza básica que se le realiza al elemento no detiene su deterioro y que la vida útil de una vela cerámica es aproximadamente de 6 meses, por lo cual el sistema siguió obstruido y disminuyendo su capacidad de filtración, finalmente se determinó que el filtro de 2 velas aumentó la tasa de filtración entre un 40,0% y un 50,0% brindando mayor producción de agua en comparación con el de una sola vela. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados en remoción, finalmente concluyeron que ambas opciones o el filtro con una vela o el filtro con 2 velas

proporciona agua de excelente calidad para el consumo humano y su elemento filtrante (vela) se debe cambiar al pasar 6 meses de uso.

La tecnología de filtración de agua por medio membranas es muy utilizada en el área de potabilización a nivel nacional y mundial de manera centralizada y descentralizada, ya que proporciona altas remociones de patógenos. Anteriormente mencionamos las membranas hechas a base de cerámicas, pero también existen membranas a base de polímeros, Ordoñez & Frechen, (2014), evaluaron la efectividad de un filtro comercial llamado PAUL, el cual consiste en una membrana de celdas planas en polietilsulfon con un tamaño de poro de 40 nm y con una columna de agua entre 60,0 y 70,0 cm y que funciona a gravedad. Es una unidad portátil para el tratamiento de agua la cual fue inicialmente construida con fines de uso en emergencias o situaciones de desastre.

Las poliétersulfona (PES) son polímeros sintéticos de resina dura y rígida, que tiene propiedades de resistencia: química, térmica y mecánica, es un material hidrofílico que posee una alta resistencia a la oxidación, catalogándola como una excelente opción para la fabricación de membranas asimétricas para procesos de ultrafiltración (UF) y como material de soporte para un sistema de osmosis inversa (Yan, 2016). Ordoñez & Frechen, (2014) estudiaron su funcionamiento implementándola para uso diario en 6 familias colombianas ubicadas en diferentes comunidades rurales del país. El estudio duró 12 meses en los cuales se realizaron análisis de turbiedad, *E. coli* y color real. Los resultados mostraron remoción de turbiedad entre el 90,0 y el 98,0%, *E. coli* 4 log (10) es decir 99,9% y color real entre 42,0 y el 82,0%, además, proporciona una dotación de 115,0 L/Hab*día pudiendo proveer agua potable a 25 familias, los autores concluyeron que el filtro proporciona agua apta para consumo humano teniendo altas remoción de material particulado como materia orgánica y microorganismos patógenos.

Los filtros de membrana también se utilizan a menor escala para el abastecimiento individual de una familia, Lifestraw Family 1.0 es un filtro avalado por la OMS como de alta protección, el cual consta de un pre filtro con una porosidad de 80,0 μm , una membrana de ultrafiltración en poliétersulfona de fibra hueca con un tamaño de poro de 0,02 micrones absolutos y una cámara halógena que libera concentraciones pequeñas de cloro para no obstruir las membranas, este filtro para uso individual tiene una eficiencia en remoción de

bacterias de 99,9% ($> 6 \log 10$), virus 99,9% ($>5 \log 10$), parásitos 99,9% ($> 4 \log 10$) y elimina turbiedad, además, provee un caudal de 12 L/h siendo una solución fácil de transportar, almacenar y realizarle mantenimiento, que proporciona agua de excelente calidad para el consumo humano, en la Figura 9 se puede observar este filtro. Esta empresa no sólo tiene este filtro para abastecimiento doméstico, también cuenta con un prototipo para bastecer más de 75 personas al día, fabricados con los mismos materiales y la misma eficiencia del primer filtro mencionado. La única diferencia entre los dos filtros es su uso, uno es ara uso individual (1 a 5 personas) y el otro puede abastecer hasta una comunidad de más de 75 personas, este es utilizado en establecimientos como colegios, hospitales entre otros.



Figura 9. Filtro Lifestraw Family 1.0

Cabe considerar por otra parte la unión de varias tecnologías, con el propósito de aumentar las eficiencias de filtración, Am Shin *et al.*, (20169, realizaron un estudio con 2 tipos de filtros híbridos con el objetivo de tratar agua con contenidos de materia orgánica altamente concentrada. El primero tenía un filtro de bioarena con un diámetro de partícula entre 0,3 y 0,7 mm y una membrana en PES con un tamaño de poro de $< 0,1 \mu\text{m}$, el segundo constaba de un filtro percolador a base de piedras que funcionaba por goteo, luego un filtro de bioarena y finalmente una membrana en PES, Para ambos tipos de filtros se analizaron parámetros como carbono orgánico total turbidez y Escherichia Coli durante 45 días, los cuales dieron como resultado que todos los sistemas removieron más del 60,0% de carbono orgánico total , El híbrido con mejor resultados a nivel general fue el filtro que constaba de un filtro percolador más 3cm de filtro de bioarena más una membrana, dado que este tenía dos

sistemas en los cuales se generaba biocapa, contribuyendo esto a la reducción de carbono orgánico total, *E. coli* y turbidez además, el prototipo tenía un sistema de recirculación de agua el cual proporcionó un mayor porcentaje de oxígeno disuelto (OD) aumentando así, la actividad microbiana presente.

Finalmente, Am Shin *et al.*, (20169),_concluyeron que la membrana en poliétersulfona solo contribuyo en un 5,0% en la eficiencia total del sistema, por el contrario, el filtro percolador y la bioarena hicieron el mayor aporte, siendo este mayor al 95,0%. Esto se le atribuye a la biocapa formada en ambos sistemas de filtración que ayudaron a la degradación del material particulado

6.2. Desinfección

La desinfección del agua es indispensable para evitar que esta sea un vínculo de transmisión de enfermedades de origen hídrico, implica la exposición de los microorganismos a condiciones físicas y/o químicas con el fin de destruirlos o detener su crecimiento. Los principales métodos de desinfección son ozonización, radiación ultravioleta, cloración, desinfección solar y plata coloidal. Sin embargo, se encontró que los métodos de radiación UV y ozonificación tienen una mayor aplicación en escalas municipales e industriales y que su implementación en escala doméstica es poca. Por este motivo no se incluirán en la revisión de este trabajo.

6.2.1. Cloración

La cloración es la alternativa de desinfección con mayor uso en latino américa y el caribe, tanto en plantas de tratamiento de agua potable como a nivel domiciliario. Para la desinfección del agua de forma individual, los compuestos de cloro más utilizados son el hipoclorito de sodio, que se presenta en estado líquido y el hipoclorito de calcio, que se encuentra en estado sólido y comercialmente lo venden en polvo y/o en pastillas, estos compuestos son de fácil accesibilidad y asequibilidad, ya que se pueden conseguir a nivel local (Witt & Reiff, 1993) y se pueden observar en la Figura 10.



Figura 10. Compuestos de cloro. Panel (a) biocloro. Panel (b) hipoclorito de calcio granular. Panel (c) hipoclorito de calcio en tabletas. Fuente: página web de Pure wáter

El Ministerio de salud en Colombia, (s.f.), recomienda agregar de 2,0 a 5,0 gotas de hipoclorito de sodio por litro de agua y dejar reposar durante 30 min, como dosis para una desinfección de agua previamente tratada en los hogares, asegurando una eliminación del 99,9% de bacterias y virus que afectan la salud. Como se mencionó en el numeral 5.2, uno de los factores que influye en la eficiencia de desinfección con cloro, es el tiempo de contacto del desinfectante y el agua, por ejemplo, Sawyer *et al.*, (2000), recomienda un tiempo de contacto entre 15 y 30 minutos, mientras que la normatividad colombiana establece que el tiempo mínimo de contacto en los sistemas de potabilización debe ser de 20 min (Ministerio de ambiente, 2007).

Uno de los problemas con la dosificación de cloro en el punto de uso, es que las personas realicen el proceso adecuadamente y en las concentraciones correctas del químico, por eso Powers *et al.*, (2021), realizaron el diseño y construcción de un dosificador automático en línea de cloro líquido de bajo costo (Figura 11), con el objetivo de aumentar el acceso a agua potable en entornos de bajos recursos, este dosificador a diferencia de otros en el mercado no necesita para su funcionamiento luz eléctrica y no cambia la forma de recolección del agua en la vivienda, se le alquilaron/ vendieron a una población de Kenia para la evaluación de su funcionamiento. Durante los 6 primeros meses de uso del dispositivo, se llevaron a cabo un control sobre las concentraciones de cloro libre presente en el agua después de pasar por el dosificador automático y encontraron que el 97,6% de las muestras tenía

concentraciones de cloro residual libre detectable, proporcionándole a las familias agua apta para consumo y la opción de almacenarla y tomarla durante el día.



Figura 11. Dosificador lineal de cloro líquido. (1) tanque de almacenamiento de cloro de 1 L; (2) válvula de manguito de la fuente; (3) tanque de flotación. Fuente: (Powers et al., 2021)

Una de las desventajas de la utilización del cloro como desinfectante, es la posible formación de compuestos orgánicos clorados, como los triclorometanos generados por reacción entre el cloro y los contaminantes orgánicos. Gilca *et al.*, (2020) y Sawyer *et al.*, (2000), realizaron estudios donde investigaron, las consecuencias que pueden conllevar la formación de estos sub productos de la cloración en la salud humana, los cuales han afirmado que estos producen problemas en el sistema nervioso y reproductivo, sin embargo, la OMS ha afirmado que se puede tener un mayor riesgo a la salud por una desinfección insuficiente que por los subproductos generados por productos químicos (Organización Mundial de la Salud, 2011), afirmando además, que el intento por controlar los subproductos del proceso no debe poner en peligro la desinfección del agua.

6.2.2. Desinfección solar

La desinfección solar consiste en colocar un recipiente lleno de agua ojalá previamente tratada, en un recipiente plástico o de vidrio transparente y luego exponerlo al sol (Figura 12). Los tiempos de exposición de los recipientes depénde de la incidencia de la luz solar y la sensibilidad de los patógenos, estos tiempos pueden varias entre 6 y 48 h (McGuigan *et al.*, 2012). Nalwanga *et al.*, (2018), realizaron un estudio en Uganda donde escogieron 50

hogares que usaban la recolección de agua lluvias, como fuente de agua para consumo, con el objetivo de evaluar la incidencia de la exposición al sol de esta. Para el estudio le entregaron a cada hogar 4 botellas PET de 2,0 L cada una, se expusieron al sol llenas de agua lluvia durante 6 horas si el día era brillante y durante 2 días si estaba nublado, determinaron y evaluaron como indicadores de contaminación enterococos fecales, *E. coli* y *Clostridium*.

Finalmente, Nalwanga *et al.*, (2018), concluyeron que después de exponer al sol el agua lluvia, la mayoría de las muestras recolectadas eran seguras para el consumo humano y determinaron que las muestras que no dieron resultados exitosos fueron por la mala manipulación de los envases, es decir, un mal lavado de las botellas previo a su uso para SODIS, por último, encontraron que los enterococos eran microorganismos más sensibles a la luz solar que el *E. coli*.



Figura 12. Desinfección solar. Fuente: (McGuigan *et al.*, 2012).

En el 2013 Garrido, Fernández & Storaci, realizaron una investigación donde estudiaron la posibilidad de implementar el SODIS como tratamiento de desinfección del agua en el estado de Carabobo en Venezuela, por lo cual expusieron al sol 2000,0 mL de agua cruda sacada directamente del Rio Chirgüa durante 6 h, transcurrido este tiempo le realizaron medición de temperatura al agua y análisis microbiológicos, los cuales arrojaron un aumento en la temperatura de 10°C , además, una eliminación de coliformes fecales y totales del 100,0%. Durante las 6 h hicieron análisis microbiológicos para identificar que microorganismo se eliminaba primero y encontraron que los coliformes fecales son más sensibles a la exposición de la radiación solar que los totales, ya que a las 3 h de estar puesto al sol se eliminaron en su totalidad.

Como se mencionó anteriormente, el material generalmente utilizado para la desinfección por SODIS son botellas plásticas, pero existen una gran variedad de tipo de plásticos, García *et al.*, (2020), realizaron un estudio donde evaluaron diferentes tipos de plásticos, con el objetivo de determinar materiales poliméricos candidatos para ser utilizados como medio para la desinfección solar, los materiales evaluados fueron: el polimetilmetacrilato (PMMA), el polipropileno (PP), el Policarbonato (PC) y el tereftalato de polietileno (PET), siendo el PET el tipo de plástico más utilizado para esta práctica.

Como resultado, García *et al.*, (2020), determinaron que el PP, el PC, el PMMA y el PET son materiales candidatos adecuados para realizar desinfección del agua por medio de la radiación solar: el PP tiene poca durabilidad cuando se expone a la intemperie, pero se puede reemplazar continuamente debido a su bajo costo en el mercado, el PET y el PC tienen una durabilidad y costos de producción moderados, y el PMMA es un plástico de alto precio en el mercado, pero relativamente no se ve afectado por la intemperie, además, concluyeron que el PMMA es el material que con un espesor de 5,0 mm logro transmitir una radiación solar de la UV-A del 97,9% y la UV-B del 97,0%, siendo estos los porcentajes más altos de transmisión de radiación solar en comparación con los otros materiales estudiados, obteniendo una inactivación bacteriana de 3 log (10) con un tiempo de exposición al sol de 0,7 h.

6.2.3. Plata coloidal

La utilización de plata coloidal como agente bactericida ha tenido un incremento en los últimos años, como complemento en estrategias de tratamiento de agua en el punto de uso, el ejemplo más común del uso de nanopartículas de la plata como agente antibacteriano es su incorporación a filtros de olla cerámica. Dung *et al.*, (2019), realizaron un estudio donde evaluaron la efectividad de la incorporación de plata coloidal a un sistema de filtración convencional (olla cerámica + carbón activado). La plata coloidal la incluyeron de dos maneras diferentes para determinar cuál de los dos generaba mejores resultados en remoción de microorganismos, la primera alternativa fue, elaborar una solución con 250,0 mL de solución de AgNO₃, con la cuál pintaron por dentro todo el recipiente cerámico, la segunda alternativa fue impregnar las partículas de carbón activado con plata coloidal.

Luego de 10 días de evaluación y recolección de muestras diarias de los filtros, los autores determinaron que ambas alternativas removían el 100,0% de los microorganismos presentes en el agua, sin embargo, la alternativa 2 género menor concentración de plata lixiviada en el proceso de filtración, lo cual influye en el tiempo de vida útil del sistema.

Estudios como Halem *et al.*, (2009) y Rivera *et al.*, (2020), han determinado que el filtro con método de desinfección de nano partículas de plata tiene una vida útil de 2 años, dado que este material con la utilización del dispositivo se empieza a lixiviar hasta eliminarse completamente del filtro, estas lixiviaciones han sido estudiadas y analizadas con el fin de determinar si podrían causar daños a la salud humana, pero Rivera *et al.*, (2020) determinó que los valores que salen de Ag en el efluente son mínimos y no causan efectos colaterales en el organismos humano.

Esta tecnología de incorporación de plata coloidal en filtros cerámicos, se ha convertido en un producto de fabricación y comercialización a nivel industrial, por ejemplo, empresas como Aquapure, Aqualogic, Kinetico, entre otras, cuentan en su portafolio con filtros de agua impregnados con nano partículas de plata coloidal, informando eliminación de microorganismos patógenos del 99,9%, dado que la obtención de la plata coloidal no es de fácil acceso local, esta alternativa generalmente no se puede recrear de forma casera, sin embargo, si se puede implementar en los hogares luego de comprada, ya que esta provee agua segura para consumo, es de fácil manejo y su tamaño se puede adaptar fácilmente a una vivienda.

Aunque el uso más frecuente de las nanopartículas de plata (AgNP) es en filtros cerámicos, Pooi & Ng, (2018), realizaron una revisión sobre los usos de este metal para la desinfección de agua y encontraron estudios donde utilizaron un filtro de agua que utiliza ceniza de cáscara de arroz con AgNP y logro una eliminación de 1 log (10) de *E. coli*, también, un papel de filtro de nanopartículas de cobre y plata que alcanzo una eliminación de *E. coli* de 4 log (10). Como estos otros estudios donde innovaron con la incorporación de la plata como agente bactericida y se obtuvieron resultados exitosos para eliminación de microorganismos patógenos presentes en el agua.

7. Discusión

Se realizó una revisión de literatura exhaustiva sobre las diferentes tecnologías de filtración y desinfección de agua para el abastecimiento doméstico. La filtración lenta en arena es un método económico y de fácil uso, pero generalmente necesita mayor área para su implementación y funcionamiento, los estudios anteriormente mencionados determinaron eficiencias de remoción de este sistema mayor al 90,0% sin embargo el proyecto Semilla (Jarrin, Ramos, & Matamoros, 2009), arrojó eficiencias por debajo de este valor, este resultado puede deberse a que el seguimiento y análisis al filtro fue de 15 días y este filtro es un sistema biológicamente activo, por los estudios sobre maduración y formación de la biocapa se sabe que el tiempo estimado para esto es de 25 a 31 días y que este es un factor fundamental que aporta a la eliminación de microorganismos en el afluente, por lo cual los resultados del proyecto Semilla son eficientes sin el aporte de esta capa biológica, dando como resultado que un filtro de arena con o sin biocapa puede eliminar un porcentaje de microorganismos mayor al 75,0%, siendo esta una alternativa factible para el uso doméstico, sin embargo, se hace recomendación de adicionar un sistema de desinfección posterior a la filtración.

Del mismo modo, el proyecto semilla evaluó la eficiencia de un filtro cerámico en forma de olla, en el cual evidenciaron un aumento en la concentración de coliformes fecales después de filtrar el agua, esto pudo deberse a un crecimiento bacteriano en el medio filtrante, además, arrojó eficiencia de remoción de *E. coli* menores al 90,0% proporcionando agua no segura, estos resultados difieren con los filtros cerámicos comerciales y de otros estudios realizados, donde las eficiencias de remoción de *E. coli* fueron del 99,9%, esto se debe a que la mayor parte de la eliminación de microorganismos lo hace el agente bactericida, que generalmente es plata coloidal ya que por sí sola, la cerámica no remueve microorganismos lo suficiente para proporcionar agua para consumo humano, ahora bien, la inclusión en los sistemas de filtración de materiales como las nano partículas de plata, hace de este método un sistema de fabricación industrial, ya que la plata coloidal no es un producto comercial de fácil acceso y asequibilidad, por lo tanto limita la utilización de esta para comunidades de bajos recursos.

Por último la utilización de membranas poliméricas para la filtración de agua, es una tecnología que en los últimos años ha ido aumentando su implementación en sistemas de uso

domésticos, este método proporciona agua de muy buena calidad con eficiencias de remoción de microorganismos patógenos del 99,9% generalmente, pero como los filtros cerámicos con plata coloidal, estas membranas deben ser de fabricación industrial por la complejidad de este proceso, es una alternativa eficiente y si se cuenta con los recursos para obtenerla es una excelente opción para el tratamiento de agua, de fácil uso y de tamaño pequeño. Aunque estas alternativas proporcionen remociones altas de microorganismo siempre es importante la implementación de un sistema de desinfección, ya que el agua después de ser tratada tiende a recontaminarse.

De todos los mecanismos mencionados de desinfección, el de más fácil adquisición, y que además tiene efecto remanente y que también es de fácil administración, es el cloro, este desinfectante químico proporciona agua de buena calidad para consumo y tiene un efecto remanente que le permite a las personas almacenar el agua filtrada para consumirla durante el día sin la posibilidad de una recontaminación del agua.

8. Alternativa de diseño del sistema de filtración y desinfección.

Basado en la información recolectada sobre sistemas de filtración y desinfección doméstica, se realizó un prediseño de un sistema de abastecimiento de agua para comunidades sin acceso a este. Se optó por un filtro híbrido (Figura 13), el cual combina la filtración lenta en arena con la tecnología de una membrana cerámica a base de arcilla, caolín, almidón y carbonato de calcio (CaCO_3), además, se recomienda que este prototipo tenga implementado el sistema de desinfección química con cloro (Cl) posterior al proceso de filtración.

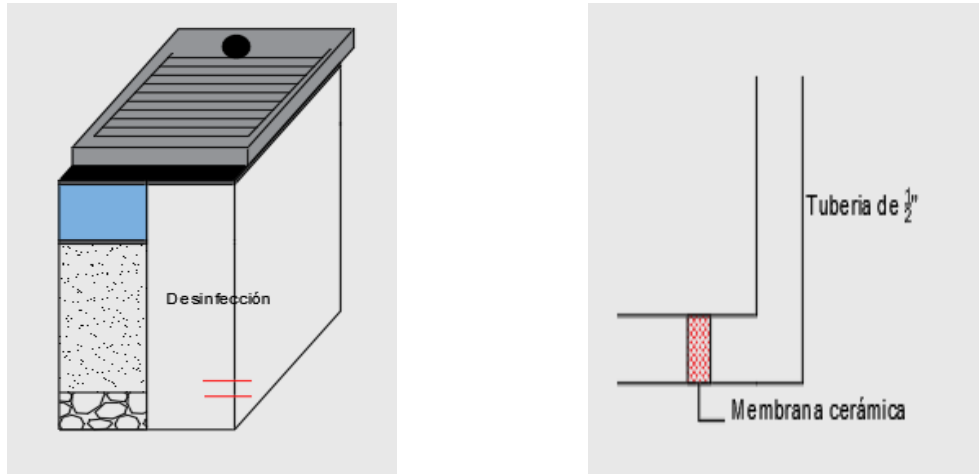


Figura 13. Prototipo filtro en arena y membrana cerámica.

Los valores seleccionados de los diferentes parámetros como: altura del medio filtrante y soporte, el tamaño efectivo de la partícula, la viscosidad cinemática y la porosidad, fueron tomados de estudios de diferentes autores y que son indicados en la Tabla 10, basadas en investigaciones ya realizadas en las cuales estos valores dieron resultados satisfactorios para tratamiento de agua. Estas propiedades se presentan en la Tabla 10.

Se seleccionó una altura total para el sistema de filtración de 1.20 m, este valor fue adoptado con el objetivo de dar comodidad a la hora de utilizar a la estructura en otros usos, por ejemplo, se recomienda usar la estructura como soporte para un lavadero de ropa, tal como se muestra en la Figura 13.

Tabla 10. Propiedades del medio filtrante (arena).

Propiedades del medio filtrante	Valor	Fuente
Tamaño efectivo de la partícula arena (mm)	0.45	Antioqueña de arenas, (s.f.).
Viscosidad cinemática del agua a 20°C (m ² /s)	1 x 10 ⁻⁰⁶	Sawyer <i>et al.</i> , (2000).
Porosidad de la arena	0.44	Antioqueña de arenas, (s.f.).
Altura del lecho de arena (m)	0.40	Jarrin, Ramos, & Matamoros, (2009).
Altura del medio de soporte (m)	0.15	Jarrin, Ramos, & Matamoros, (2009).

Para realizar los cálculos del dimensionamiento del filtro, se tomaron en cuenta algunas constantes sugeridas en el RAS. En la Tabla 11 se presentan las constantes asumidas.

Tabla 11. Parámetros para el dimensionamiento de un filtro.

Parámetro	Valor	Unidades	Fuente
Dotación neta	100,0	L/ Hab /d	Ministerio de desarrollo económico, Tabla B.2.3, (2000)
Tasa de filtración	7,2	m ³ /m ² * día	Ministerio de desarrollo económico, (2000)
Habitante por vivienda	3,1	Hab	DANE, (2018)

Luego se realizaron los cálculos pertinentes para obtener el caudal medio, el área superficial de filtración y la velocidad de infiltración, utilizando los datos de la Tabla 11. Los cálculos realizados son presentados a continuación:

- $$Q_{\text{medio}} \text{ (m}^3\text{/ día)} = (\text{Habitante por vivienda} * \text{Dotación neta}) / (1000)$$

$$= (3,1 \text{ Hab} * 100 \text{ L/Hab*día}) / (1000)$$

$$= 0,31 \text{ m}^3\text{/día}$$
- $$\text{Área superficial (m}^2\text{)} = Q_{\text{medio}} / \text{Tasa de infiltración}$$

$$= 0,31 \text{ (m}^3\text{/día)} / 7,2 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{* día)}$$

$$= 0,0431 \text{ m}^2$$

Dando un dimensionamiento de ancho/ largo / alto de: 0,02 m x 0,02 m x 1,20 m aproximadamente.

- $$\text{Velocidad de infiltración (m/día)} = (Q_{\text{medio}} / \text{Área superficial})$$

$$= 0,31 \text{ (m}^3\text{/día)} / 0,0431 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$= 7,2 \text{ m/día}$$

Con este diseño se pretende que, aparte de ser una estructura que proporcione agua de calidad, también sea funcional teniendo un lavadero en la parte superior de la estructura, cabe aclarar que las aguas grises procedentes del lavadero no ingresan al filtro si no que la tubería de

salida estaría conectada al alcantarillo de la vivienda, con el objetivo de no intervenir en la formación y maduración de la capa biológica en la arena.

Este prototipo aún está en fase de investigación y análisis, que da para investigaciones futuras su construcción y análisis de funcionamiento y eficiencias.

9. Conclusión y recomendaciones.

Un estudio detallado sobre el uso de sistemas de filtración y desinfección del agua para el consumo humano me permitió concluir que, la filtración lenta en arena es la alternativa más favorable para su implementación en zonas rurales, ya que esta alternativa logra proporcionar agua segura para el consumo humano, además, este sistema cuenta con cualidades como fácil manejo, obtención de materiales, mantenimiento y construcción, lo cual lo hace una alternativa óptima para este tipo de zonas, también que como método de desinfección de agua, la cloración es el más favorable en cuanto a costo, facilidad de uso y accesibilidad, sin mencionar su efecto remanente que le permite a las personas almacenar agua filtrada para consumirla durante el día.

Así mismo se observó que la eficiencia de un sistema de filtración lento en arena depende en gran manera de la formación y maduración de la biocapa, por lo cual se recomienda la alimentación del filtro inicialmente con agua rica en nutrientes para agilizar el proceso de formación de la capa biológica. Para asegurar la eliminación de coliformes y bacterias contenida en el agua, se recomienda realizar una limpieza periódica al filtro y darle a este un manejo adecuado, es decir, no dar otros usos al filtro para los cuales no fue diseñado inicialmente, con el objetivo de no intervenir en los procesos de filtración y así no afectar su funcionamiento.

10. Bibliografía

Aguiar, D. F., & Portela, W. (2009). Diseño y montaje del laboratorio de filtro lento de arena para agua potable. Obtenido de Repositorio de la universidad Uniminuto De Dios: https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/569/TIC_AguiarHernandezDanielFernando_09.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Akosilea, Ajibade, Lasisi, Ajibade, Adewumi, Babatola, & Oguntuase. (2019). Performance evaluation of locally produced ceramic filters for household water treatment in Nigeria. Recuperado el 11 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227619307793>

Am Shin, G., Yeol Kim, T., Soo Kim, H., Soo Maeng, M., & Dockko, S. (2016). Membrane hybrid system combined with a trickling filter and a thin layer of biosand to reduce high levels of organic matter in drinking water in developing countries. Recuperado el 10 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582016301197>

Antioqueña de Arenas. (s.f.). Recuperado el 09 de 2020, de <https://antioquenadearenas.com/>

Aqualogic. (s.f.). Recuperado el 09 de 2020, de <https://www.aqualogic.com/conocenos/>

Avila, I. R., & Moreno, M. A. (2016). *Diseño, propuesta e implementación de un filtro para tratamiento de aguas de uso doméstico en tanques de reserva en la población del casco urbano de la inspección de san antonio de anapoima*. Recuperado el 09 de 2020, de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10401/ANTEPROYECTO%20SEMINARIO%20FILTRO%20ARENA%20>

Bao, Q., Zhang, D., & Qi, P. (2011). Synthesis and characterization of silver nanoparticle and graphene oxide nanosheet composites as a bactericidal agent for water disinfection. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002197971100587X>

Castellano, P. M. A., Camargo, C. A. C., & Granados, N. R. P. (2015). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 14(2), 105-112.

Chaukura, N., Chiworeso, R., Gwenzi, W., Motsa, M., Munzeiwa, W., Moyo, W., . . . Nkambule, T. T. (02 de 2020). A new generation low-cost biochar-clay composite 'biscuit' ceramic filter for point-of-use water treatment. Recuperado el 11 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131719304673>

Chulluncuy, C. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Recuperado el 3 de 08 de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495008.pdf>

Corte Constitucional colombiana. (2011). Corte constitucional, sentencia T-740/11. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2011/T-740->

11.htm#:~:text=El%20art%C3%ADculo%2016%20establece%3A%20E2%80%9CToda,y%20telecomunicaciones%20%5B%E2%80%A6%5D%20III.

Dávila, G., & García, V. (2017). Derecho humano al agua y desigualdad social en San Jerónimo Tecóatl, Oaxaca. Recuperado el 31 de 07 de 2020, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/crca/v24n68/2448-8488-crca-24-68-157.pdf>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2018). Censo nacional de población y vivienda 2018. Recuperado el 13 de 08 de 2020, de <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-3ra-entrega.pdf>

Dung, T. T. N., Thi, L. A. P., Nam, V. N., Nhan, T. T., & Quang, D. V. (2019). Preparation of silver nanoparticle-containing ceramic filter by in-situ reduction and application for water disinfection. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103176. Recuperado el 01 de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343719302994>

Duque, W., Nordin, R., Baker, D., & Mazumder, A. (2006). The use and performance of biosand filters in the artibonite Valley of Haiti. Recuperado el 08 de 2020

EcoFiltros. (s.f.). Recuperado el 09 de 2020, de <https://www.ecofiltro.com/es/resumen-0>

El congreso de Colombia. (11 de 07 de 1994). Gestor normativo. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

FC. Andreoli, & L, S. (08 de 2020). Household slow sand filter to treat groundwater with microbiological risks in rural communities. Recuperado el 08 de 2020 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135420308885>

Fernández & Suarez, R. (2016). Agua que nos has de beber. El Tiempo. Recuperado el 14 de 08 de 2020, de <https://www.eltiempo.com/salud/como-es-la-calidad-del-agua-en-colombia-340578#:~:text=El%20agua%20contaminada%20est%C3%A1%20relacionada,el%20gastronter%C3%B3logo%20%20C3%81ngel%20Alberto%20Castro.>

Fritiani, N., Nilas, M., Wirjodirdjo, B., Hadi, W., Hermana, J., Ni'matuzahroh, . . . Maya, R. (09 de 2020). Performance of geotextile-based slow sand filter media in removing total coli for drinking water treatment using system dynamics modelling. Recuperado el 08 de 2020

García, Á., Pablos, C., García, R. A., McGuigan, K., & Maruján, J. (2020). Material selection and prediction of solar irradiance in plastic devices for application of solar water disinfection (SODIS) to inactivate viruses, bacteria and protozoa. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720326437>

Garrido, I., Da Silva, RF y Storaci, V. (2013). Evaluación del método “SODIS” en la desinfección del agua para abastecimiento en La Guadalupe, Chirgua, municipio Bejuma del

estado Carabobo. *Revista Ingeniería UC*, 20 (2), 29-38. Recuperado el 01 de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337320302927>

Gilca, Florina, A., Teodisui, C., Fiore, S., & Musteret, C. P. (11 de 2020). Emerging disinfection byproducts: A review on their occurrence and control in drinking water treatment processes. Recuperado el 12 de 2020, de <https://aplicacionesbiblioteca.udea.edu.co:2062/science/article/pii/S0045653520316702>

González, A., Martín, A., & Rosario, F. (2015). Tecnologías de tratamiento y desinfección de agua para uso y consumo humano. Recuperado el 09 de 2020, de Instituto Mexicano de tecnología del agua: https://www.researchgate.net/publication/237735438_TECNOLOGIAS_DE_TRATAMIENTO_Y_DESINFECCION_DE_AGUA_PARA_USO_Y_CONSUMO_HUMAN

Goswami, K. P., & Pugazhenti, G. (2020). Credibility of polymeric and ceramic membrane filtration in the removal of bacteria and virus from water: A review. Recuperado el 08 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720305168>

Guimaraes, R., Ibáñez, J., Litter, M., & Pizarro, R. (s.f.). Desinfección de agua. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/22cap15.pdf>

Halem, v., Laan, v. d., Heijman, G., Dijk, v., & Amy. (2009). Assessing the sustainability of the silver-impregnated ceramic pot filter for low-cost household drinking water treatment. Recuperado el 11 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508000120>

Halem, V., Laan, v. d., Soppe, & Heijmana. (11 de 2017). High flow ceramic pot filters. Recuperado el 11 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135417306188>

Jarrin, F., Ramos, P., & Matamoros, D. (2009). Proyecto semilla "Evaluación de sistemas de filtración agua de bajo costo para consumo humano". Recuperado el 07 de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/28797009_Proyecto_Semilla_Evaluacion_De_Sistemas_De_Filtracion_Agua_De_Bajo_De_Costo_Para_Consumo_Humano

Joyce, McGuigan, Elmore-Meegan, & Conroy. (1996). Inactivation of Fecal Bacteria in Drinking Water by Solar Heating. Recuperado el 12 de 2020, de <https://aem.asm.org/content/62/2/399>

Li, G.-Q., Wang, W.-L., Huo, Z.-Y., Lu, Y., & Hu, H.-Y. (2017). Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of *Escherichia coli*. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135417307856>

Li, G.-Q., Wang, W.-L., Huo, Z.-Y., Lu, Y., & Hu, H.-Y. (2017). Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of *Escherichia*

coli. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135417307856>

Li, Q., Mahendra, s., Lyon, D. Y., Brunet, L., Liga, M. V., Li, D., & Alvarez, P. J. (2008). Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135408003333>

Márquez-Bravo, L. G. (1998). Desinfección solar. In *En memorias de Simposio Regional sobre Calidad del Agua: Desinfección Efectiva*. Lima, CEPISOPS (pp. 1-22). Recuperado el 01 del 2021, de http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/desinfeccion_solar.pdf.

Martínez Pineda, S. L., & Cubides Aguilar, J. C. (2019). *Diseño e Implementación de un Sistema de Ozonificación Electrónico que Aporte a la Disminución de Microorganismos Presentes en el Agua*. Recuperado el 01 de 2021, de <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1438>.

McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H. J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernandez-Ibanez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *Journal of hazardous materials*, 235, 29-46. Recuperado el 01 de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389412007960>

Ministerio de ambiente, v. y. (22 de 06 de 2007). Ministerio de la protección social. Recuperado el 3 de 08 de 2020, de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislacion%20del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2007). Resolución número 2115. Recuperado el 08 de 2020, de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislacion%20del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). Recuperado el 08 de 2020, de <https://es.slideshare.net/mariaeugeniahernandez/anexo-tnico-ras-2000-ttulo-j>

Mutemi, S., Hoko, Z., & Makurira, H. (2020). Investigating feasibility of use of bio-sand filters for household water treatment in Epworth, Zimbabwe. Recuperado el 10 de 2020 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706519301172>

Naciones Unidas. (25 de 09 de 2015). Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado el 10 de 2020, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Nalwanga, R., Muyanja, C. K., McGuigan, K. G., & Quilty, B. (2018). A study of the bacteriological quality of roof-harvested rainwater and an evaluation of SODIS as a suitable treatment technology in rural Sub-Saharan Africa. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(3), 3648-3655. Recuperado el 01 de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343716304493>

Nyangaresi, O. P., Qin, Y., Chen, G., Zhang, B., Lu, Y., & Shen, L. (2019). Comparison of UV-LED photolytic and UV-LED/TiO₂ photocatalytic disinfection for *Escherichia coli* in water. Recuperado el 12 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586118312872>

Organización mundial de la salud & United Nations International Children's Emergency Fund. (2015). Informe 2015 del PCM sobre el acceso a agua potable y saneamiento: datos esenciales. Recuperado el 10 de 2020, de https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/es

Organización Mundial de la Salud. Directrices para la calidad del agua potable (cuarta ed.), OMS / UNICEF., Ginebra (2011)

Pérez, A., Díaz, J., & González, P. G. (12 de 2014). Estudio comparativo de dos sistemas de filtración casera para el tratamiento de agua para consumo humano. Recuperado el 09 de 2020, de <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/761/>

Pooi, C. K., & Ng, H. Y. (2018). Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. *npj Clean Water*, 1(1), 1-8. Recuperado el 01 de 2021, de <https://www.nature.com/articles/s41545-018-0011-0>

Powers, J. E., McMurry, C., Gannon, S., Drolet, A., Oremo, J., Klein, L., ... & Pickering, A. J. Design, performance, and demand for a novel in-line chlorine doser to increase safe water access. *npj Clean Water*, 4(1), 1-8. Recuperado el 01 de 2021, de <https://www.nature.com/articles/s41545-020-00091-1>

Pure Water. (s.f.). Recuperado el 09 de 2020, de <https://purewater.com.co/product/filtro-familiar-velas-de-ceramica/>

Rivas, G., Flores, E., & Ramírez, J. (2014). Evaluación del sistema de potabilización de agua constituido por filtros de bioarena y dióxido de titanio. Recuperado el 06 de 2020

Rivera, S., Ocampo, I., Silva, J., Flórez, L., Castaño, A., Dávila, A., . . . Perez, A. (2020). A novel filtration system based on ceramic silver-impregnated pot filter combined with adsorption processes to remove waterborne bacteria. Recuperado el 9 de 2020, de <https://www.nature.com/articles/s41598-020-68192-y>

Santiago, D., Bracho, N., & Torres, D. (2013). Potabilización del agua empleando tratamientos no convencionales en poblaciones rurales. Centro de Investigación del Agua, Universidad del Zulia-Venezuela.

Sawyer, C. N., McCarty, Perry, L., & Parkin, G. F. (2000). Química para Ingeniería Ambiental, Cuarta edición. Colombia: Mc Graw Hill. Recuperado el 12 de 2020

Secretaría de economía (2018). Perfil del mercado Sílice. Recuperado el 12 de 2020, de Secretaría de Economía México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419278/Perfil_S_lice_2018__T_.pdf

Witt, V. M., & Reiff, F. M. (1993). *La desinfección del agua a nivel casero en zonas urbanas marginales y rurales*. Organización Panamericana de la Salud. División de Salud y Ambiente. Recuperado el 01 de 2021, de http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/Desinfeccion_Agua_Casero_Zonas_%20Urbanas_%20Marginales_Rurales.pdf

Yan, A. M. (2016). Membranas basadas en polisulfona sulfonada para ultrafiltración y ósmosis inversa. Recuperado el 12 de 2020, de https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/474/1/PCM_D_Tesis_2016_Yam_Marcial.pdf

Zhao, Y., Huang, G., An, C., Huang, J., Xin, X., Chen, X., . . . Song, P. (02 de 2020). Removal of Escherichia Coli from water using functionalized porous ceramic disk filter coated with Fe/TiO₂ nano-composites. Recuperado el 11 de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714419307275>