

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Contrucciones

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Departamento de Ingeniería Hidráulica**

**Título** Evaluación de materiales locales en la fabricación de filtros para el tratamiento de agua potable.

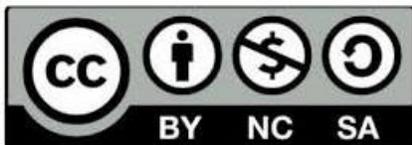
**Autores** Miguel Antonio Villarreal Veloz

**Tutores** MSc. Ing. István Gómez Ríos

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

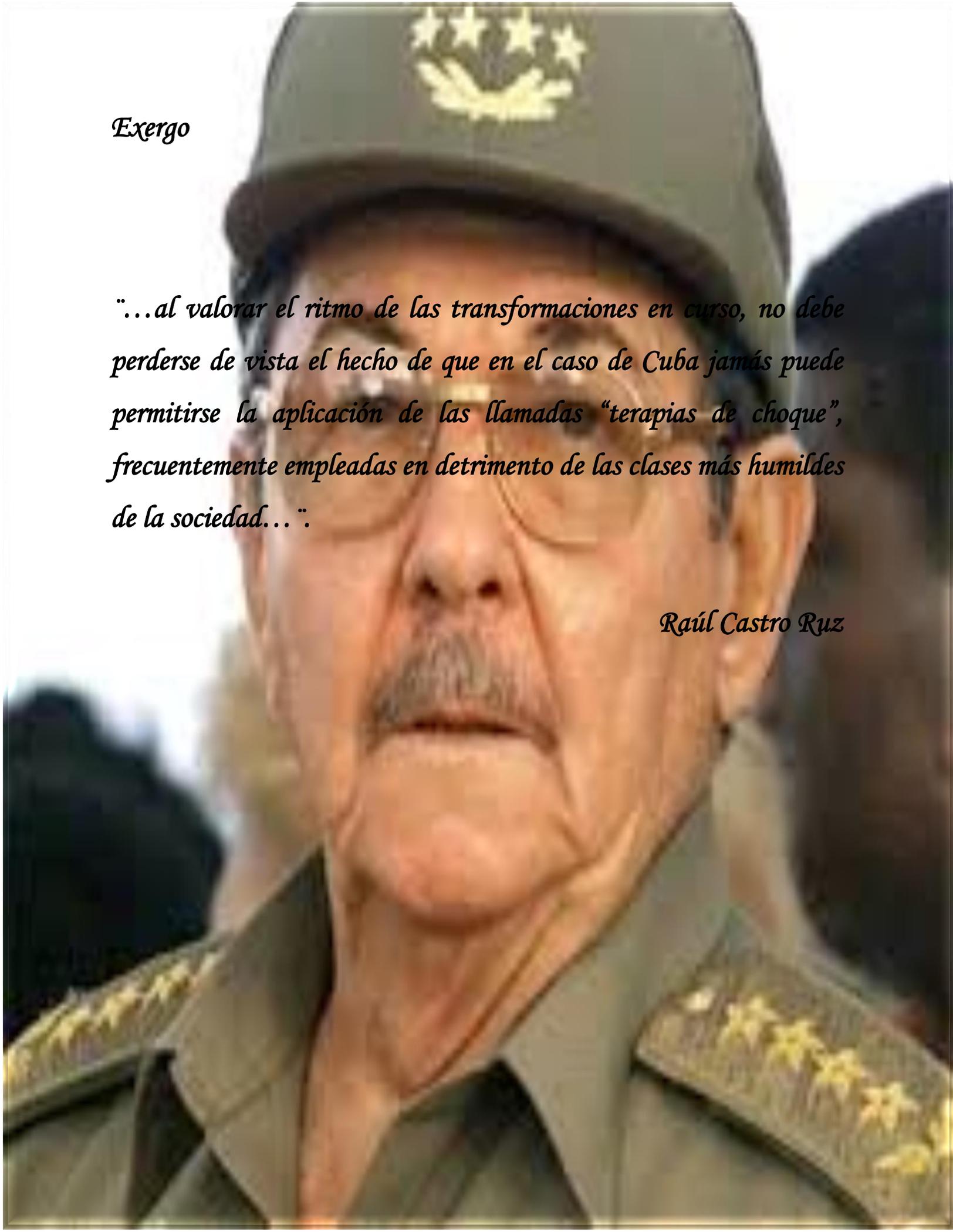
**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

A close-up portrait of Raúl Castro Ruz, an elderly man with a mustache and glasses, wearing a dark green military cap with a gold emblem and a matching uniform jacket with gold epaulettes. The background is blurred.

*Exergo*

*“...al valorar el ritmo de las transformaciones en curso, no debe perderse de vista el hecho de que en el caso de Cuba jamás puede permitirse la aplicación de las llamadas “terapias de choque”, frecuentemente empleadas en detrimento de las clases más humildes de la sociedad...”.*

*Raúl Castro Ruz*

## **Resumen**

El presente estudio se llevó a cabo en la búsqueda de una solución sostenible y adecuada a las condiciones reales. Para lo cual se inició con un análisis de la bibliografía. Posteriormente se implementaron criterios de los sistemas de tratamiento de agua a escala de laboratorio que consistían en filtros rápidos de arena acompañados por filtración con arena saneadas, Zeolitas y arena Sílice. Como pre y postratamiento, se ha evaluado pH, coliformes fecales, color y turbidez como parámetros indicadores básicos de calidad del agua, con lo que se demostró su eficiencia al obtener porcentajes de remoción de turbidez y coliformes fecales por encima del 10%. El DQO<sub>5</sub>. Se encuentra por debajo de la norma, así como la temperatura del agua. La granulometría se seleccionó de acuerdo a lo expresado por criterios ingenieriles internacionales entre 5.0y 2.5 mm.

## INDICE:

INDICE: .....	5
Introducción .....	8
Hipótesis.....	9
Objetivo General.....	9
Objetivos específicos.....	10
Tareas a desarrollar .....	10
Estructura de la tesis .....	10
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE .....	12
1.1. Antecedentes del tratamiento de aguas.....	12
1.2. Tratamiento del agua potable.....	15
1.3. Teoría de la filtración.....	18
1.4. Descripción del proceso de filtración lenta de arena .....	20
1.5. Mecanismos involucrados en los procesos de filtrado. ....	21
1.6. Sedimentación. ....	24
1.7. Criterios de diseño de los componentes .....	24
1.8 Filtración con grava.....	25
CAPÍTULO II. Fabricación del biofiltro de arena y ensayos hidráulicos.....	27
2.1. Materiales .....	27
2.2. Toma de Muestras Iniciales .....	29
2.3. Análisis físico – químico del agua. ....	30
2.4. Permeabilidad de los suelos. ....	31
2.5. Ensayo de permeabilidad a carga constante. ....	34
2.6. Preparación de la muestra .....	35
CAPÍTULO III. Análisis de los resultados. ....	36
3.1. Población. ....	36
3.2. Muestra. ....	36
3.3. Calculo de la población: .....	36
3.4. Análisis de la turbidez .....	36
3.5. Análisis granulométrico .....	38
3.6. Temperatura del agua.....	40

3.7. Análisis de los parámetros químicos.....	40
3.8. Análisis del pH .....	41
3.9. Análisis de la DBO .....	41
3.10. Análisis y cálculo de eficiencia de remoción de los parámetros.....	42
3.11. Análisis de la eficiencia de remoción del DQO. ....	42
3.12. Análisis de la eficiencia de remoción del DBO5.....	43
3.13. Análisis de la eficiencia de remoción de los ST. ....	44
3.14. Análisis de coeficiente de filtración (kf). ....	45
3.15. Caudal de diseño del filtro.....	45
3.16. Sostenibilidad ambiental. ....	46
Conclusiones.....	47
Recomendaciones.....	49
Bibliografía.....	50
ANEXOS.....	52

## **Definiciones y abreviaturas**

### **Definiciones**

Afluente: Líquido que ingresa a un componente.

Agua cruda: agua no sometida al proceso de tratamiento.

Caudal: Volumen expresado en litros por segundo (lps) para el cual es diseñada la unidad.

Control: Proceso permanente y sistemático de comprobación, mediante programas establecidos de muestreo y otros procedimientos.

Desinfección: Proceso que consiste en eliminar los microorganismos patógenos que pueden estar presentes en el agua, mediante el uso de equipos especiales o sustancias químicas.

Efluente: Líquido que sale de un proceso de tratamiento

Filtro: Elemento que, interpuesto en un flujo, permite eliminar parte de los elementos de ese flujo, normalmente elementos no deseados.

Múltiples etapas de tratamiento: Implica tener más de una etapa de tratamiento.

Materia Orgánica Natural o Color Real: Asociado a carbono orgánico disuelto o sustancias húmicas.

pH: Medida de la acidez (< 7) o alcalinidad (> 7) de un compuesto.

Turbiedad: Falta de Claridad de un líquido, causada por las partículas suspendidas. Definido por la medida de dispersar la luz a través de una muestra. Se usan índices como FTU, NTU, etc.

## **Introducción**

Actualmente la Universidad Central Marta Abreu de las Villas recibe agua de los embalses: Presas Minerva y Ochoita, además cuentan con agua subterránea que se puede extraer de pozos profundos; sin embargo, en ocasiones la calidad de los procesos de potabilización se ven comprometidos en cuanto a turbiedad y pH, en muchos casos debido al alto grado de concentración y proporción del hipoclorito de sodio utilizado para desinfectar el recurso agua.

La filtración rápida de arena ha sido ampliamente usada como método para mejorar la calidad del agua en diferentes regiones del planeta, debido a su simplicidad en la operación y a sus numerosas ventajas. En las últimas décadas estos han sido implementados para mejorar las condiciones del agua después de eventos meteorológicos y desastres naturales cuando se ve truncado el tratamiento por los métodos tradicionales de potabilización o para uso individual en las viviendas, teniendo gran acogida.

Se ha demostrado que los filtros rápidos de arena han funcionado de manera exitosa en zonas tanto urbanas como rurales alrededor del mundo, muchas de las cuales subsisten de manera precaria, permitiendo mejoramientos en materia de salud pública y en la calidad de vida de los habitantes de éstas zonas, incluso en se ha evidenciado su buen funcionamiento y el impacto positivo que generan este tipo de tecnologías.

La presente investigación evaluó el método de filtración lenta de arena como alternativa para obtener agua potable con materiales locales disminuyendo costos y ofreciendo una alternativa ante las nuevas condiciones.

Este estudio, se realizó implementando sistemas de filtros lentos de arena a escala de laboratorio con el fin de tratar el agua que actualmente usa la población, es decir, agua de los embalses antes mencionados y de pozos profundos, para posteriormente medir ciertos parámetros del agua tratada y compararlos con la normativa cubana 827/12 de agua potable para determinar si esta es apta para el consumo humano.

Se pudo constatar que los filtros lentos de arena son una buena alternativa para mejorar la calidad del agua, obteniendo altos porcentajes de remoción de turbidez, color

y coliformes fecales, sin alterar otros parámetros como el pH, como también se ha obtenido en investigaciones recientes sobre el tema a nivel nacional e internacional.

Se llevó a cabo en una zona muy significativa que refleja la situación actual en materia del acceso al agua potable de muchas regiones de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, a partir de aquí (UCLV), por lo cual los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser usados como base para el desarrollo de futuros proyectos de ingeniería que brinden otro tipo de soluciones a la problemática planteada, de Ahí que se defina como problema de investigación el siguiente:

### **Problema científico**

Con la ocurrencia de fenómenos atmosféricos se ha puesto de manifiesto que el agua sufre una transformación tanto química como física donde los niveles de turbidez y contaminación microbiológica afectan de manera considerable en cuanto a calidad del producto y servicio a los consumidores. Para apalejar esos problemas se necesita un alto cumulo de materiales decantadores como la alúmina y filtros de grava para el mejoramiento de estos índices, los que en muchos de los casos son importados y su adquisición es dificultosa.

Los filtros en nuestro país a pesar del esfuerzo se tupen con frecuencia y se demora el servicio a los consumidores, provocando malestar y generando una baja eficiencia en nuestros sistemas de potabilización.

### **Hipótesis**

Si utilizamos filtros rápidos de arena fabricados con materiales locales se puede realizar la potabilización de las aguas y disminuir gran parte de las materias contaminantes al igual que la disminución de los coliformes fecales y los coliformes totales, así mismo lograr un adecuado pH del agua que se encuentre en los límites de las normas cubanas.

### **Objetivo General**

- Evaluar los materiales locales en la fabricación de filtros rápidos para el tratamiento de agua potable.

### **Objetivos específicos**

- Realizar la revisión bibliográfica respecto al uso de los biofiltros de arena en los tratamientos de agua
- Confeccionar un biofiltro de arena a escala de laboratorio
- Seleccionar los materiales filtrantes para establecer los criterios de filtración
- Evaluar los parámetros de coliformes totales y fecales, DQO y DBO<sub>5</sub>, así como niveles y la eficiencia de estos siguiendo normas cubanas.

### **Tareas a desarrollar**

1. Revisión bibliográfica del tema donde se pueda arribar a conclusiones sobre la base a la realización de un filtro de arena a escala de laboratorio.
2. Recolección de materiales que puedan ser empleados en la confección del filtro usando para ello muestras del territorio de Villa Clara.
3. Análisis de las muestras que permitan establecer criterios de coeficientes de filtración, tamaño de partículas y otros parámetros.
4. Ensayos necesarios que a partir de un análisis estadístico de réplicas de ensayo nos permitan arribar a conclusiones generales en correspondencia con los objetivos de este trabajo.

Este trabajo es *novedoso*, pues supone aporte práctico para establecer los criterios necesarios a la hora de diseñar un sistema de tratamiento de aguas utilizando biofiltración a partir del uso de materiales del territorio de Villa Clara, que permitirán disminuir la turbidez y otros parámetros de contaminación en las aguas, disminuyendo así el costo de producción de los filtros, de acuerdo con la política de los Lineamientos Económicos del PCC para el periodo 2016-2021 respecto a la disminución de las importaciones y desarrollando las tecnologías del patio.

### **Estructura de la tesis**

La tesis se estructurará en tres capítulos divididos en:

**Capítulo I:** Revisión del estado del arte de las bibliografías concernientes a los sistemas de tratamiento de aguas potables por biofiltración para consumo humano así como seleccionar los materiales para la realización de este trabajo.

**Capítulo II:** Confeccionar un filtro de bioarena de filtración rápida de agua a escala de laboratorio, estableciendo las granulometrías recomendadas en las bibliografías, seleccionando los materiales y realizando procesos de lavado y saneamiento de las materias primas así como realizando los ensayos correspondiente para arribar a conclusiones en el capítulo III de este trabajo.

**Capítulo III:** Discusión de los resultados en este apartado se expresarán los resultados obtenidos así como se emitirán criterios propios que conlleven al cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo.

## **CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE**

### **1.1. Antecedentes del tratamiento de aguas**

En los Lineamientos de política económica y social del PCC y la Revolución para el periodo 2016-2021 en sus artículos 104, 105, y 107 se plantea la necesidad de capacitar y adelantarse a las nuevas tecnologías para dar respuesta a la prevención y mitigación de impactos sociales y medioambientales, en la nueva ley del agua también se recoge el uso de las aguas superficiales y subterráneas (Cuba, 2016, POPULAR, 2018) .

El tratamiento de aguas adecuado para la producción de agua potable es un factor muy importante que debe determinarse cuidadosamente. El crecimiento sostenido de la población en el país genera la necesidad de consolidar medios de abastecimiento seguros y confiables, por ello, la selección de adecuados procesos de tratamiento es una decisión de gran importancia para una empresa dedicada al saneamiento de aguas.

Conjuntamente, las normas de agua potable tienden a ser cada vez más rigurosas para asegurar la calidad del agua producida y resguardar debidamente la salud de los consumidores, de acuerdo a la tendencia internacional. Las técnicas usadas con este fin deben apuntar a cumplir de manera eficiente las nuevas exigencias y alcanzar los requerimientos de la población.

Se han propuesto alternativas para los materiales de construcción de los filtros, entre los cuales se encuentra el concreto, el plástico, el metal o incluso contenedores indígenas, y en cuanto al material constituyente del lecho filtrante (CAWST, 2008).

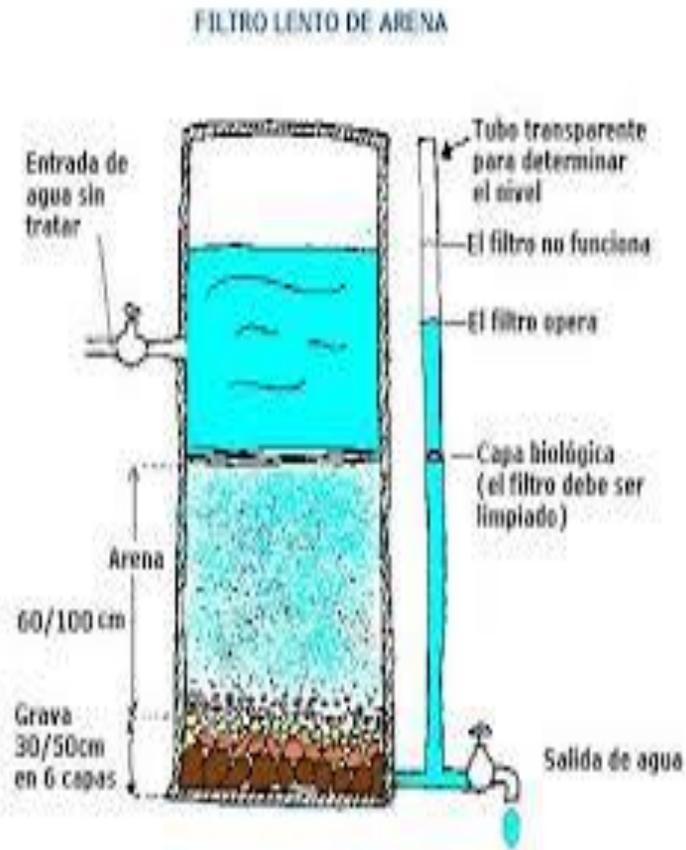


Figura 1.1. Dimensiones de un biofiltro. fuente (CAWST, 2008)

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

Sin embargo, para investigaciones de corta duración, tiempos de espera de 30 días no resultan convenientes para el desarrollo de los proyectos, aún menos cuando se requiere cambiar el afluente al sistema de tratamiento de filtros lentos de arena, puesto

que es necesario esperar a que se reestructure la capa biológica y se adapte a las nuevas condiciones de nutrientes del nuevo afluente. La tendencia en materia de filtros lentos de arena a nivel internacional consiste en buscar la manera de optimizarlos y lograr una buena relación costo – beneficio y de esta manera poder implementarlos especialmente en comunidades rurales.

De igual forma, en Cuba se han realizado estudios acerca de la implementación de filtros lentos de arena para mejorar la calidad del agua que algunos asentamientos rurales están recibiendo para su consumo, iniciando con una fase experimental en el laboratorio para probar la efectividad de estos filtros antes de implementarlos en las comunidades, teniendo en cuenta diferentes parámetros del agua potable y las normas que los regulan. La mayoría de estas investigaciones han evaluado sus resultados comparando la calidad del agua filtrada con lo establecido en la NC de Agua, analizando parámetros como color, turbidez, coliformes fecales, pH, y otros.

La eficiencia del uso de filtros lentos de arena ha sido demostrada para la potabilización del agua en comunidades rurales en posos como los que tenemos en las casas, llegando a la conclusión de que el sistema de filtros lentos de arena para uso doméstico es viable para zonas en las cuales no se tiene acueducto, puesto que mejora las condiciones microbiológicas y fisicoquímicas del agua problema ( Aguiar, 2009).

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

En cuanto al sistema de tratamiento de agua que se propone con este proyecto, el cual consiste en filtros con materiales locales , ha sido abordado en algunas investigaciones en la Universidad de la Habana, a nivel de pregrado, se desarrolló una tesis en el programa de Ingeniería Hidráulica, en la que se evaluó el proceso de filtración con aguas sintéticas a tasa constante con turbiedades de 16 a 24 UNT, usando una planta

piloto de filtración conformada por tres torres de filtros, cuyo lecho filtrante consistía en capas de antracita, arena y grava, con la que se midió el grado de remoción de turbidez, obteniendo una eficiencia de la planta de 99% (Villabona, 2007).

## **1.2. Tratamiento del agua potable**

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

El tratamiento del agua potable puede darse de dos formas, mediante sistemas convencionales de tratamiento y mediante sistemas no convencionales de tratamiento. Los primeros hacen referencia a los procesos llevados a cabo en las plantas convencionales de tratamiento, entre estos se encuentran: Coagulación – Floculación, sistemas de filtración, procesos de membrana, desinfección química/oxidante, sistemas de absorción e intercambio iónico, sistemas de extracción con aire y tratamiento solar. Por otro lado, los sistemas no convencionales de tratamiento de agua potable se refieren a los mecanismos de fácil acceso, poco valor monetario, bajos costos de mantenimiento y/o realizados con materiales poco comunes encontrados en la zona de estudio, estos sistemas son destinados en gran medida a poblaciones vulnerables, las cuales no cuentan con los recursos suficientes para la instalación de una planta de tratamiento de agua potable, este método está realizado a partir de la ley de Darcy (Sanchez, 2014).

Algunos de los sistemas conocidos para el tratamiento de agua utilizados más frecuentemente en los países en vías de desarrollo son la cloración, la filtración, la desinfección solar, la filtración/cloración combinadas, y la floculación/cloración combinadas.

### **a. Desalación por Destilación Solar**

Un método de tratamiento para remoción de salinidad adecuado a pequeñas comunidades es la destilación solar, que también se podría aplicar para la remoción

de dureza. Entre los diferentes tipos de destiladores para comunidades rurales se encuentran los destiladores tipo caseta y los de convección natural o tipo escalera. En México se han diseñado y probado dispositivos de tipo caseta con charolas de fibra de vidrio o metálicas y cubiertas condensadoras de vidrio a dos aguas o de una sola inclinación. El principio básico de la desalinización solar es del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un área de material transparente, en cuyo fondo se encuentra agua salada en reposo; dependiendo de la radiación solar y la velocidad del viento, una fracción del agua salada se condensa en la cara interior y por medio de una determinada inclinación, el agua libre de sales cae en un recipiente para ser almacenada (Carolina Mercado, 2015). Cabe destacar que estos tratamientos en Cuba, están en estudio por la alta complejidad de sus instalaciones.

En general, los destiladores son caros por inversión inicial y su bajo rendimiento comparado con las grandes superficies que utilizan. El principio de funcionamiento es muy sencillo: la charola se llena con agua salina o salobre y por acción de la energía solar el agua se evapora; luego se condensa sobre la superficie de vidrio y finalmente el agua se conduce por canaletas hasta un pequeño depósito ( Mercado, 2015).

La base sirve para absorber un alto porcentaje de radiación solar incidente, mientras que la cubierta es transparente al espectro visible de la radiación solar para permitir el paso de ésta, y opaca a las longitudes de onda mayores (infrarrojo) para evitar la pérdida de calor por radiación del interior del destilador al ambiente. Pueden producir hasta 5 litros/día -m<sup>2</sup> cuando hay más insolación, pero su rendimiento disminuye en días nublados (Bareño, 2016).

#### b. Filtro Lento de Arena Común

La filtración lenta en arena (FLA) como etapa principal de tratamiento, juega un papel muy importante en el mejoramiento de la calidad del agua en zonas rurales y urbanas marginadas, por su eficacia, facilidad de diseño y sencillez en su operación y mantenimiento. Los filtros lentos de arena (Ver figura 1.1) reducen drásticamente el número de virus (total), bacterias (99 - 99.9%), protozoarios o huevos de

nematodos (hasta 99.99%) dañinos para la salud. La turbiedad del efluente en un filtro bien diseñado y operado puede llegar a 1 UTN (BAREÑO, 2016)

La remoción de carbono orgánico biodegradable se logra hasta en un 50%, y se lleva a cabo por la actividad biológica que se genera en los lechos. El color real se remueve hasta en un 60% con ayuda de pre oxidación. El hierro se puede reducir del 30 al 90%, pero los filtros se colmatan rápido si el contenido de hierro es mayor a 1 mg/l por lo que es necesario empacar el filtro con un grano de arena más grande (~0.5 mm) que el normal (T.E. 0.3 mm). Con el fin de alcanzar largas carreras de filtración, el agua que alimenta los filtros debe tener turbiedades promedio menores a 10 UTN, logradas con ayuda de los filtros gruesos (BAREÑO, 2016).

Una gran variedad de microorganismos (bacterias, protozoarios, algas, hongos, microcrustáceos y nematodos) forman una delgada capa biológica sobre la superficie del lecho de arena (20 mm), la cual es en gran medida responsable del mejoramiento de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua. El filtro de arena consta de un tambo de lámina o plástico de 200 litros, empacado con una capa de arena fina y una o dos capas soporte de grava graduada. Opcionalmente puede llevar una capa intermedia de carbón vegetal. Además requiere tubería de PVC o galvanizada, conexiones y un par de llaves.

Trabaja a flujo descendente y la biocapa del lecho de arena necesita agua y alimento continuo y la arena debe mantenerse húmeda, por lo tanto, el filtro debe preferentemente funcionar sin interrupción. La tasa de filtración debe ser constante en la medida de lo posible y dentro del rango de 0.01 a 0.1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-hr. Cuando la turbiedad sea mayor a 10 UTN pero menor a 30, es conveniente colocar un lecho de gravilla sobre una malla o charola perforada que actúe como pre-filtro encima de la arena. La pre- filtración gruesa previene que el filtro lento se obstruya en corto tiempo, ayudando a mejorar la calidad del agua filtrada. Estos filtros lentos de arena caseros pueden proporcionar de 2.5 a 25 litros por hora de agua filtrada, razón por lo cual se debe almacenar en tanques para tener una reserva. Si el filtro trabajara las 24 horas del día, la producción sería tal que a cada miembro de una familia de 5

personas le corresponderían hasta 120 litros diarios de agua de buena calidad para todo uso (BAREÑO, 2016, Carolina Mercado, 2015)

### **1.3. Teoría de la filtración**

La filtración es una de las operaciones unitarias más importantes en el tratamiento del agua para el consumo humano. Su objetivo básico es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación-floculación. En consecuencia el trabajo del filtro, depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios.

Según Canosa y Sánchez (2014), entre los parámetros que influyen en la eficiencia de la filtración se encuentran:

- Calidad de agua influente.
- Granulometría del material filtrante.
- Resistencia química y mecánica del material filtrante, forma de las partículas.
- Altura del lecho.
- Carga hidráulica.
- Velocidad de operación.

Atendiendo a los materiales filtrantes más usados, se destacan la arena y la antracita; sin embargo, en la actualidad se reportan con muy buenos resultados: el polietileno y la zeolita natural.

#### **Filtración lenta de arena**

La filtración lenta de arena es un proceso consistente en filtrar lentamente el agua no tratada a través de una cama porosa de arena, el agua entra a la superficie del filtro y luego drena por el fondo. Este proceso permite mejorar la calidad del agua.

#### **Elementos de un filtro rápido de arena**

En la figura 1.2 se presentan los componentes básicos que constituyen un filtro lento de arena que se describen a continuación:

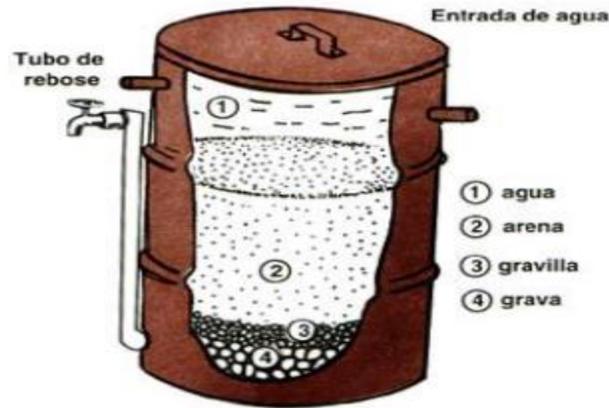


Figura 1.2. Componentes básicos de un filtro de arena. Fuente: (Filtros, 1999).

- Reserva de agua cruda: capa de agua en la parte superior que se encuentra sobre el estrato de arena fina, su principal función es la de mantener una cabeza constante de agua sobre el filtro, esta cabeza proporciona una presión hidráulica que empuja el agua a través del filtro.
- Schmutzdecke (lodo biológico o piel de filtro): capa constituida por material de origen orgánico que se forma con el tiempo, a través de la cual debe pasar el agua antes de llegar al medio filtrante. Esta capa está formada principalmente por algas y otras numerosas formas de vida, como plancton, protozoarios y bacterias contenidas en el agua problema.
- Lecho de arena: medio para que la comunidad de microorganismos se desarrolle sobre él, es en esta capa donde se desarrolla la mayor parte del proceso físico de la filtración. Este medio debe estar compuesto por granos duros y duraderos, libres de arcilla y materia orgánica. El diámetro efectivo usualmente está entre 0.15 mm – 0.35 mm, ha sido demostrado experimentalmente que tanto el material más fino como el más grueso de este rango trabajan satisfactoriamente en la práctica, por lo que al final la selección tendrá que depender de los materiales locales disponibles. Usualmente se coloca en la parte inferior del lecho una capa de arena más gruesa que permita una mejor transición entre la capa de grava y la capa de arena.
- Grava de soporte: las capas de grava tienen dos funciones, soportar el lecho de arena y proporcionar salida del agua más fácilmente desde la base del lecho de arena. Las

rocas que conforman estas capas deben ser duras, preferiblemente redondas, y debe estar libre de arena, arcilla, suciedad y de materia orgánica.

- Sistema de drenaje: asegura la recolección uniforme del agua a través de toda el área de filtración. Las capas de grava deben cubrir en su totalidad este sistema de drenaje.

#### **1.4. Descripción del proceso de filtración lenta de arena**

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

En la capa superior de la superficie filtrante, la cual corresponde a la arena, se forma una película delgada denominada schmutzdecke constituida por una gran variedad de microorganismos, biológicamente muy activos, sin embargo, se requiere un tiempo de maduración entre 3 y 5 semanas para la formación del mismo (Aguiar , 2009)

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

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

Debido a los procesos que se efectúan, la superficie de las partículas del material filtrante también es revestida por una película biológica similar al Schmutzdecke con bajo contenido de algas, pero con un gran número de bacterias, las cuales continúan absorbiendo impurezas y otros residuos. En la parte inferior del medio filtrante disminuye la cantidad de alimento produciéndose así otro tipo de bacterias, las cuales

utilizan el oxígeno disuelto en el agua y los nutrientes que se encuentran en solución .(OPS, 2005)

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

### **1.5. Mecanismos involucrados en los procesos de filtrado.**

Entre los mecanismos involucrados en los procesos de filtrado se encuentran los mecanismos de remoción, los mecanismos de transporte y los mecanismos biológicos de la desinfección. Los mismos, se describen a continuación:

Mecanismos de remoción: Existe un coeficiente de remoción del filtro ( $\lambda$ ), el cual puede ser determinado por medio de dos componentes que son: el coeficiente de probabilidad de colisión ( $\eta$ ) y el coeficiente de adherencia ( $\alpha$ ), los cuales, a su vez, son expresados mediante los mecanismos de remoción de un filtro lento de arena: transporte, adherencia y biológico (CAWST, 2008).

Mecanismos de transporte: En esta etapa se dan procesos principalmente hidráulicos, bajo condiciones de flujo laminar y considerando que el grano de arena se comporta como una obstrucción que interrumpe el flujo del agua. En la Figura 1.3 se muestran los diferentes mecanismos mediante los cuales ocurre la colisión entre las partículas y los granos de arena.

Se define el coeficiente  $\eta$  como la oportunidad de colisión entre una partícula y un grano de arena y el número de colisiones por unidad de desplazamiento determina el potencial de remoción mediante la filtración (Aguiar, 2009).

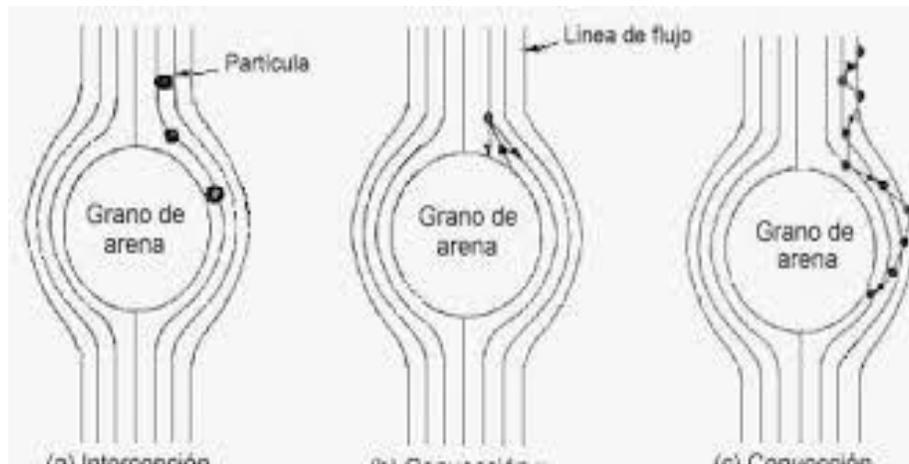


Figura 1.3 Mecanismos de transporte en la filtración lenta de arena.

Mecanismo biológico de la desinfección: Como se indicó anteriormente, la remoción total de partículas en este proceso se debe al efecto conjunto del mecanismo de adherencia y el mecanismo biológico para la formación de la capa. Es necesario que para que el filtro opere como un verdadero sistema de desinfección, la capa biológica se encuentre establecida y bien formada.

Solo cuando esta situación se presenta, el sistema de filtración funciona como un depurador de la contaminación microbiológica contenida en un agua problema y podrá operar correctamente. Entonces se dice que el filtro maduró, lo que puede tardar 4 y 5 semanas, en donde se recomienda no consumir el agua que sale del sistema de filtración debido a que la capa está en su etapa de estabilización.

Al iniciarse el proceso de descontaminación, los microorganismos contenidos en el agua problema utilizan como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica y pueden multiplicarse en forma selectiva, lo que contribuye a la formación de la película biológica del filtro (CAWST, 2008).

Estos oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de esta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta se convierten en materia viva. Los productos del metabolismo son llevados por el agua a profundidades mayores y son utilizados por otros organismos. El contenido

bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y se relaciona directamente por la capacidad que tienen dichos organismos de encontrar el sustrato para disminuir su tasa de mortalidad, durante la cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas y así consecutivamente

Siguiendo el anterior proceso, la materia orgánica degradable presente en el agua problema se descompone progresivamente en agua, bióxido de carbono y sales como sulfatos, nitratos y fosfatos, los cuales son descargados en el efluente del filtro. La actividad bacteriológica tiende a ser más pronunciada en la parte superior del lecho filtrante y decrece gradualmente con la profundidad y la disponibilidad de sustrato. Cuando se limpian las capas superiores del filtro se remueven las bacterias que se han estabilizado, siendo necesario un nuevo periodo de maduración del filtro hasta que se logre desarrollar la actividad bacteriológica necesaria para la generación

### **Arena**

El filtro lento como procesos de desinfección. A partir de 0.50 m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula, produciendo así reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación microbiológica en amoníaco y a los nitritos en nitratos (nitrificación).

Como el rendimiento del filtro lento depende principalmente de la formación de la capa biológica, si esta no se forma robustamente la eficiencia es baja y no debe considerarse al sistema como un depurador de materia orgánica, sino como un mejorador de la calidad del agua, sobretodo de las características organolépticas.

Subproductos desarrollados durante la desinfección Estos subproductos del proceso de filtración lenta se pueden considerar sustancias naturales producto de la degradación biológica de la materia orgánica en el agua y los cuales no se consideran un riesgo para la salud, ya que el proceso no requiere de sustancias químicas que reaccionen con la materia disuelta en el agua. En tal sentido, los subproductos de la filtración lenta son dióxido de carbono y sales relativamente inocuas, además de un contenido bajo de oxígeno disuelto, pero entre los parámetros de calidad. Estas condiciones pueden ser revertidas con un proceso de aireación en el agua de salida.

## **Otras consideraciones.**

1. Tamizado de la muestra: Actúa únicamente en la superficie de la arena y sólo con las partículas cuyo tamaño sea mayor al de los espacios dejados por la arena. El cernido puede ocasionar colmatación de la capa superficial afectando así el resto del proceso de filtración.
2. Intercepción: Consiste en la colisión de una partícula con un grano de arena cuando la primera es conducida mediante una línea de flujo muy cerca al grano de tal manera que roce con la superficie de éste.

### **1.6. Sedimentación.**

Ocurre gracias a la fuerza de gravedad que actúa sobre las partículas cuya masa es suficiente para superar la densidad del agua en el que se **encuentran**.

### **1.7. Criterios de diseño de los componentes**

Consideraciones específicas (OPS, 2005).

a) Periodo de diseño: Se recomienda un período de diseño de las instalaciones entre 8 y 12 años de manera que guarde armonía con la dinámica de crecimiento de la población y con el costo de oportunidad de acceso a la financiación del proyecto.

b) Periodo de operación: Las unidades de tratamiento deben ser diseñados para periodos de operación de 24 horas, siendo 2 el número mínimo de unidades en paralelo y así alternarlas cada vez que se requiera realizar mantenimiento. La continuidad en la prestación del servicio evita riesgos de contaminación en la distribución, en almacenamientos inadecuados o en la operación de la planta.

c) Caudal de diseño: Las unidades en una planta de tratamiento serán diseñadas para el caudal máximo diario.

## **Hidráulica de la filtración**

El análisis de la hidráulica de la filtración permite establecer criterios de conducción de fluidos para lo que se establecen los siguientes pasos a la hora de fabricar los biofiltros.

- Requerimientos para su instalación.
- Purificación del agua en el filtro.
- Aplicación de los filtros.
- Ventajas y limitaciones de los filtros.
- Tratamientos adicionales en un sistema con filtros lentos de arena.
- Sedimentación Simple.

### **1.8 Filtración con grava**

Remueve algas, lama u otros contaminantes orgánicos así como arena, rocas, gravilla y otros contaminantes inorgánicos.

Protege sistemas de riego por goteo o micro-aspersión del taponamiento eliminando partículas de hasta 200 mesh o 75 micras en el filtrado (Salud, 2005).

### **Filtro lento de arena**

Una unidad de filtración lenta en arena consta generalmente de los siguientes elementos: a) caja de filtración y estructura de entrada, b) sistema de drenaje, c) lecho filtrante, d) capa de agua sobrenadante y e) dispositivos para regulación, control y rebose (Salud, 2005).

#### **Caja de filtración y su estructura de entrada:**

La caja del filtro posee un área superficial condicionada por el caudal a tratar, la velocidad de filtración y el número de filtros especificados para operar en paralelo. Se recomiendan áreas de filtración máxima por módulo de 100 m<sup>2</sup> para facilitar las labores manuales de operación y mantenimiento del filtro (Salud, 2005).

- a) La estructura consta de un vertedor de excesos, canales o conductos para distribución, dispositivos para medición y control de flujo, cámara de entrada y ventana de acceso al filtro propiamente dicho.

b) Lecho filtrante: El medio filtrante debe estar compuesto por granos de arena duros y redondeados, libres de arcilla y materia orgánica. La arena no debe contener más de 2% de carbonato de calcio y magnesio.

La velocidad de filtración varía entre los 0.1 y 0.2 m/h dependiendo de la calidad del agua cruda. A mayor contaminación del agua afluyente menor velocidad de filtración. La altura del agua sobre el lecho filtrante puede variar entre 1.0 y 1.50 m.

## **CAPÍTULO II. Fabricación del biofiltro de arena y ensayos hidráulicos.**

La confección del biofiltro a escala de laboratorio se realizó con materiales del territorio de Villa Clara principalmente siguiendo algunos de los criterios obtenidos en la revisión bibliográfica: como tamaño medio de las partículas de los materiales utilizados, los que se exponen posteriormente en este epígrafe

### **2.1. Materiales**

Los materiales usados son de adquisición propia y para ello se utilizaron 3 tanques fabricados en la EMI he Guevara de Manicaragua, (La Campana), de (PAD) a 5 l cada uno separando los materiales: el primero se cargó con arena sílice, el segundo con arena saneada de Arimao del poblado de Manicaragua en Villa Clara. La altura del medio filtrante es de 5 cm.

La arena sílice procede del yacimiento de Trinidad, presentando más de un 90% de óxido de silicio, con una granulometría entre 0,5 - 2,5 mm y diámetro promedio 1,0 mm y actualmente en uso en los filtros de la planta.

La zeolita natural procede del yacimiento de San Juan de los Yeras, Ranchuelo, Villa Clara, presentando más de 61% de material zeolítico, con una granulometría entre 0,5 - 2,5 mm y diámetro medio de 1,1 mm.

En la tabla a continuación se exponen los materiales usados en el presente trabajo investigativo:

Figura 2.1 materiales usados en esta investigación,

- a) Arena con saneamiento.
- b) Zeolita.
- c) Arena sílice.

Materiales usados en el biofiltro



Los filtros rápidos fueron diseñados en recipientes de 5 l o 0,005 m<sup>3</sup>, como se muestra en la figura 2.2 con un área aproximada de 0.024 m<sup>2</sup>, y un volumen de 0,0047 m<sup>3</sup>.



Figura: 2.2 Filtros confeccionados (elaboración propia).

Las capas filtrantes están separadas, los de arena presentan una granulometría bastante regular, la de zeolita posee una granulometría irregular por lo que se separó la fracción más pequeña para cumplir con los criterios obtenidos de la bibliografía consultada, ambos materiales presentan una granulometría irregular por lo que se decide realizar la separación granulométrica.



Figura: 2.3 Serie de tamizas de la Norma ASTM c-3 147/92

Los materiales antes descritos se sometieron a un proceso de lavado durante 30 minutos para retirar las materias extrañas producto de la obtención en las canteras y catalizar el proceso de transparencia o índice de turbiedad el cual se debe obtener en el laboratorio.

Los parámetros a controlar tanto en la operación de filtración fueron, velocidad de operación, volumen de agua, tiempo de la operación, % expansión, flujo de aire y agua para el lavado; así como las características fisicoquímicas del agua influente y efluente.

## **2.2. Toma de Muestras Iniciales**

Se solicitó a un laboratorio certificado de la Delegación de Recursos Hidráulicos de Santa Clara los envases para la toma de una muestra inicial del agua en el río Ochoita que pasa por las áreas de UCLV.

En esta muestra inicial se efectuó el procedimiento de acuerdo a las especificaciones del laboratorio, siguiendo la debida cadena de custodia y conservación del agua.

### **Materiales de laboratorio usados.**

- Buretas.
- Lámpara de alcohol.
- Matraz Erlenmeyer.
- Pipetas de 10 ml.
- Probetas.
- Soporte universal.
- Varilla de vidrio.
- Vasos de precipitación.
- Membranas de esterres de celulosa de Millipore.
- Termómetros.

En la tabla a continuación, se muestran algunos de los instrumentos de laboratorio usado para la realización de tomas de muestra y ensayos.

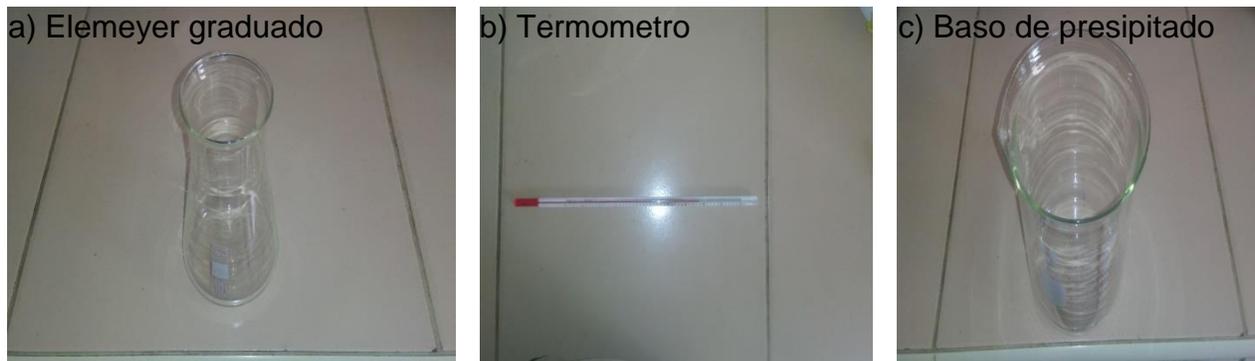


Figura 2.4. Instrumental de laboratorio empleado.

### 2.3. Análisis físico – químico del agua.

#### Análisis físico.

#### Determinación de conductividad y sólidos totales disueltos.

- Principio: Es un equipo con electrodo de platino, cuya célula se presenta en forma de pipeta o de inmersión. La elección de la célula depende de la amplitud esperada de conductividad y de la amplitud de resistencia del instrumento. Permite realizar la conversión de conductividad/STD ajustables al usuario y a una temperatura determinada.



Figura 2.5. Conductímetro, marca HACH, modelo Sension 5.

#### Determinación de turbidez: Método Nefelométrico.

Principio: Este método se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas y la dispersada por una solución patrón de

referencia en idénticas condiciones. Cuanto mayor es la intensidad de la luz dispersada, más intensa es la turbidez.

**Determinación de color: Método de comparación visual.**

Principio: El color se determina mediante comparación visual de la muestra con concentraciones conocidas de soluciones coloreadas. La comparación también puede realizarse con discos especiales de cristal de color, adecuadamente calibrados. El método patrón de medida de color es el de cobalto – platino, siendo la unidad de color I producido por 1 mg de platino/L en forma de ión cloroplatinato.

**Determinación de pH: Método electrométrico.**

Principio: Se basa en la medida de la actividad de los iones hidrógeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia. El electrodo de hidrógeno consiste en un electrodo de platino por el que se pasan burbujas de hidrógeno gaseoso a una presión de 101 kPa.

**2.4. Permeabilidad de los suelos.**

La habilidad de los materiales porosos para facilitar el flujo de agua tiene mucho significado en muchos problemas ingenieriles. La permeabilidad hidráulica de suelos y rocas puede ser definida como la propiedad del material que permite el flujo de agua a través del mismo bajo un gradiente de presión.

La permeabilidad hidráulica de un suelo es importante para problemas de ingeniería tales como:

- 1-Filtración
- 2-Sedimentación
- 3-Estabilidad
- 4-Drenaje

El estudio de permeabilidad del suelo es esencial en la planificación de proyectos mayores tales como: Represas, terraplenes, basureros, y sitios de desperdicios nucleares.

Los suelos de grano grueso son considerados altamente permeables y por lo tanto su coeficiente de permeabilidad es alto. Los suelos de grano fino de cualquier modo tienen muy bajo coeficiente de permeabilidad. Los valores típicos de coeficiente de permeabilidad están dados en la tabla 2.1.

	Rango del tamaño de las partículas				Tamaño efectivo		Coeficiente de permeabilidad		
	Pulgadas		Milímetros		D20 "	D10m m	Ft/yr	Ft/mo	cm/s
	Dmáx	Dmin	Dmáx	Dmin					
Flujo turbulento									
Piedra muro	120	36	-	-	48	-	100x10 <sup>8</sup>	100x10 <sup>5</sup>	100
Piedra	12	4	-	-	6	-	30x10 <sup>8</sup>	30x10 <sup>5</sup>	30
Grava limpia y fina	3	1/4	80	10	1/2	-	10x10 <sup>8</sup>	10x10 <sup>5</sup>	10
	3/8	1/16	8	1.5	1/8	-	5x10 <sup>8</sup>	5x10 <sup>5</sup>	5
	1/8	1/32	3	0.8	1/16	-	3x10 <sup>8</sup>	3x10 <sup>5</sup>	3
Flujo laminar									
Arena uniforme gruesa	1/8	1/64	2	0.5	-	0.6	0.4x10 <sup>8</sup>	0.4x10 <sup>5</sup>	0.4
Arena uniforme media	-	-	0.5	0.25	-	0.3	0.1x10 <sup>8</sup>	0.1x10 <sup>5</sup>	0.1
Arena y gravilla limpia bien graduada	-	-	10	0.05	-	0.1	0.01x10 <sup>8</sup>	0.01x10 <sup>5</sup>	0.01
Arena fina uniforme	-	-	0.25	0.05	-	0.06	4000	400	40x10 <sup>-4</sup>
Arena y grava limosa bien graduada	-	-	5	0.01	-	0.02	400	40	4x10 <sup>-4</sup>
Arena limosa	-	-	2	0.005	-	0.01	100	10	10 <sup>-4</sup>
Limo uniforme	-	-	0.05	0.005	-	0.006	50	5	0.5x10 <sup>-4</sup>
Arcilla arenosa	-	-	1	0.001	-	0.002	5	0.5	0.05x10 <sup>-4</sup>

Limo arcillosa	-	-	0.05	0.001	-	0.001 5	1	0.1	0.01x10- 4
Arcilla (30 a 50 %)	-	-	0.05	0.000 5	-	0.000 8	0.1	0.01	0.001x10 -4
Arcilla coloidal	-	-	0.01	10	-	40	0.001	10-4	10-5

Tabla: 2.3 Valores típicos del coeficiente de permeabilidad de diferentes materiales.

Los métodos directos para determinar el coeficiente de permeabilidad de las muestras de suelo en el laboratorio incluye el ensayo de permeabilidad de carga constante, el de carga descendente y el ensayo de permeabilidad de pared flexible. Las siguientes referencias posibilitan una ayuda completa en la conducción correcta del ensayo de permeabilidad:

El procedimiento para ensayos de suelo se realizó según lo, Publicado por la Sociedad Americana de Ensayo y Materiales.(ASTM D 2434)

### 2.5. Ensayo de permeabilidad a carga constante.

El ensayo de permeabilidad se realizó en un equipo PERMEÁMETRO COMBINADO, Modelo: K-605 Al perteneciente al Laboratorio de Suelos de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara el que se muestra en la figura 2.1.



Figura: 2.6. Permeámetro combinado, modelo: k-605 Al

## **2.6. Preparación de la muestra**

La muestra representativa de suelo secado al aire para el ensayo de carga constante debe ser un suelo de grano grueso, donde más del 90% de estas partículas son retenidas en el tamiz N° 200 (0.074 mm). Se selecciona una doble cantidad de muestra requerida para el llenado de la cámara del permeámetro aproximadamente 800 gramos. Prepare la muestra cómo sigue y como lo indica la INSTRUCCIÓN DE OPERACIÓN:

1- Se mezcló suficiente agua dentro de la muestra para prevenir la separación del tamaño de las partículas durante la colocación dentro del permeámetro.

Debe añadirse suficiente agua para que la mezcla fluya libremente formando capas.

2- Se Removió la tapa de la cámara (figura 1, N° 5 y la cámara superior (figura 1, N° 4) con esta unión se destornillan las tres tuercas de la tapa de las piedras de estrías o moleteado (figura 1 N° 6) y levantando al final el vástago hasta unirlo (figura 1, N° 7 y 8). Luego se Coló una piedra porosa dentro del soporte del anillo. (figura 1, N° 2 en la base de la cámara.

### **CAPÍTULO III. Análisis de los resultados.**

El análisis de resultados en este apartado permite arribar a conclusiones en cuanto a los objetivos planteados para ello emitimos los criterios partiendo de los ensayos de laboratorios realizados al agua, pero primeramente se debe establecer el tamaño de las réplicas o de población a muestrear.

#### **3.1. Población.**

Para definir el número total de ensayos, se realizó una consulta documental en base a la experiencia de investigaciones previas. Se pudo determinar que la eficiencia del filtro empieza a manifestarse a partir de los 30 días [25], se realizará la toma de muestra para los ensayos de laboratorio dos veces por semana cada 4 días por un periodo de 36 días y diez muestras para el análisis.

#### **3.2. Muestra.**

Para el cálculo del tamaño de la muestra, se procedió usar el 4% de error, considerando la variabilidad de las condiciones de ensayo de la columna de biofiltración.

#### **3.3. Calculo de la población:**

$$n = \frac{m}{e^2(m - 1) + 1} \quad \text{Ec 3.1}$$

Dónde:

n= Muestra

e= Error admisible.

m= Población o Universo.

$$n = \frac{5}{0.04^2(5 - 1) + 1}$$

n = 4.97 muestras ≈5

#### **3.4. Análisis de la turbidez**

Análisis de los niveles permisibles tolerables de acuerdo a la NC 827/2012 agua potable. Realiza el análisis de turbiedad y coloración del agua a la entrada y salida evaluado en el periodo de 24 horas divididas en 4 horas respectivamente para la observancia según citan varios autores (Paredes, 2010).

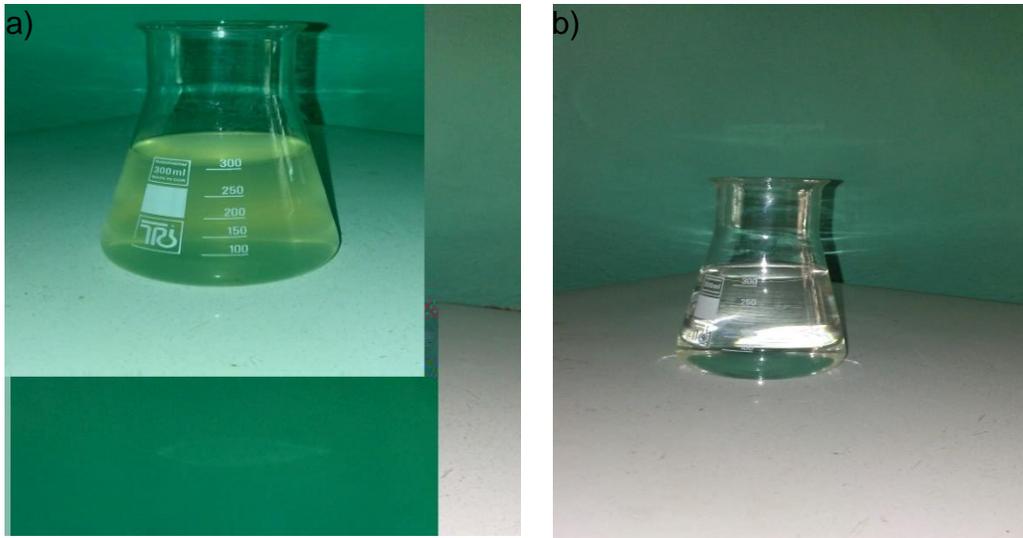


Figura 3.1. Muestras de agua antes (a) y después (b) del tratamiento en 24 horas.

Como se puede observar las muestras indican una coloración no adecuada, cosa que no quiere decir que en estos parámetros no se puede abastecer de agua a una población dada, siempre y cuando sea potable y los rangos o índices de potabilidad sean los dictados por las Normas Cubanas.

No.	Horas de filtración	Color de entrada	Color de salida
1	1	Azul marino	Celeste opaco
2	4	Azul oscuro	Marrón
3	8	Azul oscuro	Verde
4	12	Azul oscuro	Celeste
5	24	Azul oscuro	celeste

Tabla 3.1. Variación del color durante la biofiltración.

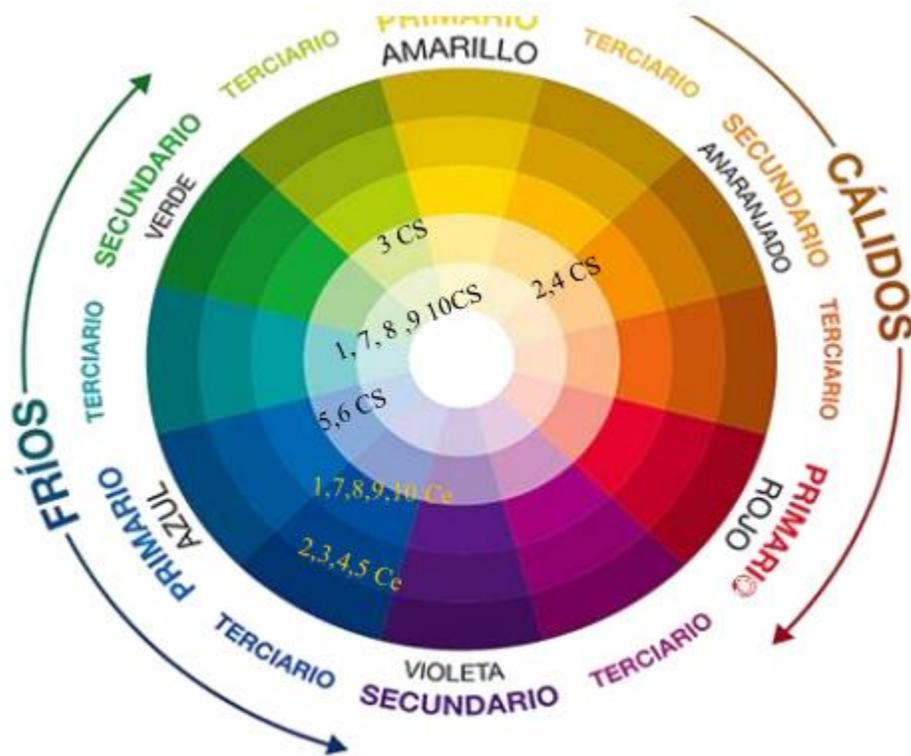


Figura 3.2. Esquema de Colores fuente.

Con los resultados obtenidos mediante la observación, se puede precisar de forma visual que el color de las muestras analizadas, varían considerablemente. La variación del color es perceptiblemente diferente antes de la biofiltración y posterior a ella. Con lo cual podemos decir que el cambio de color fue positivo, pasando de colores oscuros y opacos a colores más claros casi transparente, y con indicios subjetivos pero verdaderos demostrando que una de las propiedades de los filtros es la disminución de la turbidez del agua tratada.

### 3.5. Análisis granulométrico

En la tabla a continuación se muestra el análisis granulométrico de la fracción de arena de Arimao y de la Zeolita, utilizando para ello la serie de tamices ASTM.

Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
No 4	4,75	1,12	475	100
No10	2,00	152,12	323	68
No 20	0,85	23,60	24	34
No 40	0,43	12,45	11	16
No 60	0,25	3,56	8	11
No 140	0,11	3,03	5	7
No 200	0,074	0,70	4	6

Tabla: 3.2. Granulometría de la arena Zeolítica.

Como se observa en la tabla anterior la mayor fracción se retiene en el tamiz de 2.00 mm para un 32 % de la población y el menor valor en el de 4.75mm permitiendo obtener una fracción que se encuentre dentro de los sugeridos por los fabricantes exteriores y la bibliografía consultada.

Tamiz	Diámetro (mm)	Retenido (g)	Pasa (g)	Pasa (%)
No 4	4,75	5,09	490	99
No10	2,00	97,54	392	79
No 20	0,85	17,47	32	51
No 40	0,43	14,55	17	28
No 60	0,25	6,34	11	18
No 140	0,11	6,18	5	8
No 200	0,074	1,30	4	6

Tabla: 3.3. Granulometría de la arena Arimao.

En la tabla 3.3 la mayor fracción se retiene en el tamiz de 2.00 mm para un 21 % de la población y el menor valor en el de 4.75mm permitiendo obtener también una fracción que se encuentre dentro de los sugeridos por los fabricantes exteriores y la bibliografía consultada.

Con el análisis anterior podemos concluir que la arena con saneamiento y la zeolita tienen una distribución granulométrica aceptada para la construcción del biofiltro.

### 3.6. Temperatura del agua.

Para la medición de la temperatura se utilizó un termómetro de mercurio y se realizó la medición antes y después del agua.

Temperatura antes del filtrado (°C)	Temperatura después del filtrado (°C)
26	21

Tabla 3.4. Comparación de la temperatura.

Como podemos observar en la tabla 3.2 la temperatura del agua disminuye desde 26 - 21 (°C) refrescando debido al paso del líquido por los intersticios, propiedad que adquiere el agua y la hace más aceptable al paladar y permite la disminución de los microorganismos presentes en ella, ya que la disminución de la temperatura influye en la proliferación de estos bióticos anulando los procesos de reproducción.

### 3.7. Análisis de los parámetros químicos

A continuación en la tabla 3.2 se analiza según NC 27/99 VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A LAS AGUAS TERRESTRES Y AL ALCANTARILLADO. ESPECIFICACIONES.

No.	Horas de filtración	DQO(mg/L)	Lim máximo según NC	ST(mg/L)	Límite Max ST	DBO(mg/L)	Límite máximo DBO 5
1	1	995	<700	1411	1600	647	250
2	4	1381	<700	2644	1600	898	250
3	8	1087	<700	3311	1600	707	250
4	12	778	<700	2786	1600	857	250
5	24	479	<700	968	1600	506	250

Tabla 3.5. Resumen de parámetros físicos químico después de la biofiltración NC.

No.	Horas de filtración	DQO(mg/L)	DQO(mg/L) filtrado	Límite máximo
1	1	1620	995	<700
2	4	1620	1381	<700
3	8	1620	1087	<700
4	12	1620	778	<700
5	24	1620	479	<700

Tabla 3.6. Cuadro comparativo de DQO, posterior a la biofiltración del agua del río.

Resultados obtenidos en 24 horas de biofiltración, donde se observa que en la primera filtración (1h) se logró remover el DQO, en las horas 1 al 8 se observa un remoción leve del DQO causado por la estabilización del biofiltro y por retención inadecuada del agua residual de 12 horas en la filtración; en los posteriores horas donde se realizó una filtración continua (sin retención) y con el filtro ya estabilizado, se observa una disminución considerable del DQO llegando a niveles menores a los establecidos en la tabla 1 Límites Máximos Permisibles Promedio (LMPP) para los parámetros de los residuales líquidos de la norma cubana

### 3.8. Análisis del pH

### 3.9. Análisis de la DBO

No.	Horas de filtración	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L) filtrado	Límite máximo según NC
1	1	1035	647	<300
2	4	1035	898	<300
3	8	1035	707	<300
4	12	1035	657	<300
5	24	1035	506	<300

Tabla 3.7. Cuadro comparativo del DBO<sub>5</sub>, posterior a la biofiltración del agua de río.

Con los resultados obtenidos del DBO5 se observa que en la primar a filtración existe remoción DBO5, en las horas 1 y 4, se observa una menor remoción causada por la estabilización del biofiltro y por la retención de 24 horas del agua del rio. A partir de las 8 horas se observa una disminución paulatina del DBO<sub>5</sub>, llegando a valores permisibles por el NC 27/99.

### 3.10. Análisis y cálculo de eficiencia de remoción de los parámetros.

Análisis y cálculo de la eficiencia de remoción del biofiltro sobre cama de turba de los parámetros DQO, DBO5, ST. Dicho análisis permitirá establecer que tan eficiente es la turba en cuanto a la depuración del agua residual.

### 3.11. Análisis de la eficiencia de remoción del DQO.

Usando la fórmula:

$$EF = \left( \frac{DQO_e - DQO_s}{DQO_e} \right) * 100 \quad \text{Ec 3.1}$$

Se han obtenido los porcentajes de remoción a lo largo de un mes de análisis, donde se observa la variación de los porcentajes de remoción.

No. muestra	Horas de muestreo	% Eficiencia de muestreo
1	1	38.58
2	4	14.75
3	8	32.90
4	12	18.59
5	16	51.98
6	20	70.43
7	24	71.42

Tabla 3.5. Tabla de eficiencia de remoción durante un periodo de tiempo.

Realizando un análisis de los porcentajes de la eficiencia de remoción que el biofiltro presenta a lo largo del tiempo de estudio, se observa que en las primeras 12 horas de biofiltración la eficiencia del filtro fue baja con porcentajes de 38.59%,14.75%, 32.90%, 18.59 %; ya que, en este tiempo se producía una estabilización de las

propiedades de depuración de la turba (adsorción, absorción, intercambio iónico, porosidad). Posterior a las 16 horas de biofiltración y con el biofiltro estabilizado, se observa mayores porcentajes de remoción del DQO, con valores de: 51.98%, 70.43%, 71.42%.

### 3.12. Análisis de la eficiencia de remoción del DBO5.

Usando la siguiente fórmula obtendremos los valores de remoción del parámetro en biológico en estudio.

$$EF = \left( \frac{DBO5e - DBO5s}{DBO5e} \right) * 100 \quad \text{Ec 3.2}$$

Se han obtenido los siguientes datos:

No. de muestreo	Horas de muestreo	% Eficiencia de remoción DBO <sub>5</sub>
1	1	37.5
2	4	13.2
3	8	31.6
4	12	17.2
5	16	51.1
6	20	70
7	24	71.2

Tabla 3.6. Eficiencia de remoción durante un periodo de tiempo

Al igual que en el análisis de eficiencia de remoción del DQO, en el análisis de este parámetro podemos observar como la variación se comporta de una manera en que, en las primeras 12 horas de filtración se observa eficiencias bajas 37.49%, 13,24%, 31.69%, 17.20%, en donde el biofiltro sobre cama se estabiliza internamente, para luego de este período de tiempo tener una mejor eficacia. En los próximas horas de filtración los porcentajes de eficiencia se elevan rápidamente alcanzando niveles, tiene valores de: 51.1%, 70.0%, 71% llegando a un máximo que se desconoce ya que no se realizaron estudios posteriores.

### 3.13. Análisis de la eficiencia de remoción de los ST.

Usando la siguiente fórmula obtendremos los valores de remoción del parámetro en estudio:

$$EF = \left( \frac{STe - STs}{STe} \right) * 100 \quad \text{Ec 3.3}$$

No. de muestreo	Horas de muestreo	% de remoción
1	1	18.2
2	4	0.0
3	8	0.0
4	12	0.0
5	16	0.0
6	20	43.0
7	24	44.4

Tabla 3.7. Eficiencia de Remoción ST.

En el caso del análisis de los sólidos totales presenta una variación diferente a los anteriores parámetros, observándose un aumento significativo de los sólidos totales en las primeras 16 horas con valores de : 18.20%, sin embargo en las posteriores horas de filtraciones se observa que la eficiencia de remoción de los ST es nula ya que los valores aumentaron por acción de las estabilización de los materiales internos del biofiltro, con mayor cantidad de macropartículas en suspensión que quedan sin precipitar.

En las horas posteriores de biofiltración, se observa un comportamiento más uniforme de la eficiencia de remoción del ST, con valores de remoción de: 43.88%, 44.52%, donde se verifica que los ST fueron removidos con éxito llegando niveles casi permitidos por las NC 27/99.

### 3.14. Análisis de coeficiente de filtración (kf).

En el anexo 1 de este trabajo podemos encontrar los datos del análisis de filtración de los materiales a carga constantes donde podemos decir que para una altura del cilindro de 17.50 cm la profundidad de la piedra alcanzo 1.20 cm, para obtener un coeficiente de filtración, (Kf), de la arena Arimao de 0,0936 cm/s.

Con respecto a la zeolita manteniendo las mismas condiciones se obtiene un coeficiente que se expresa en el anexo 2 de este trabajo de 0.0978 cm/s lo que puede estar relacionado a que la granulometría de la zeolita es mayor y por ende el tamaño del intersticio permite una filtración más rápida del fluido

### 3.15. Caudal de diseño del filtro.

Con la velocidad de filtración de las muestras y el área del filtro procedemos a calcular el caudal de diseño con la siguiente fórmula.

$$Q = A * Vf \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$Q = 0.0804.28 * 0.005A = 0.0004021m^3/s$$

Donde:

Q = caudal m<sup>3</sup>/s

A= área de la sección m<sup>2</sup>

V= Velocidad m/s

### Desinfección por cloración.

Es necesario aplicar una dosis de cloro para disminuir o eliminar los coliformes fecales y totales. Se debe aplicar 2 mg de cloro en cada litro de agua, siendo la densidad del mismo 3214 mg/l

Se cloraran 5 litros para la disminución y eliminación del coliformes total

$$v = \frac{m}{\rho} = 3.11cm^3 \quad \text{Ec.3.5}$$

### **3.16. Sostenibilidad ambiental.**

De manera general, los sistemas de tratamiento de aguas potables deben ser monitoreados constantemente con el propósito de llevar la data de la eficiencia de las diferentes etapas de tratamiento y de la calidad con que el líquido llega a los consumidores.

En Cuba la política del agua esta encaminad al mantenimiento de la calidad del agua y se establecen de manera obligatoria estableciendo un monitoreo periódicamente ya sea potable o residual:

por ejemplo, se deben efectuar muestreos compuestos de al menos 12 horas, tomando muestras del agua en el sistema de tratamiento y en las redes de abasto tomado para ello diferentes puntos de esta red, con una frecuencia de cuatro meses (tres muestreos por año). Estos muestreos y análisis deben incluirse como un costo periódico según exija la legislación vigente.

Aunque las leyes cubanas solo establecen el monitoreo en las plantas potabilizadoras y en los efluente, es recomendable realizar análisis de todas las etapas con el fin de conocer el comportamiento del sistema. Ello resultará útil para resolver problemas relacionados con la eficiencia del sistema.

El sistema de biofiltro, además de ser eficiente para la remoción de contaminantes, no genera olores desagradables, no presenta grandes espejos de agua expuestos al ambiente y, por su aspecto, se puede integrar como un objeto más que combina con el paisaje en casas, lo cual favorece su sostenibilidad ambiental.

## Conclusiones

1. El proceso de biofiltración, por presentar una alta eficiencia en el proceso de potabilización de agua, debe ser motivo de estudio e investigación con el objeto de mejorar su diseño, manejo y operaciones de mantenimiento. Lo anterior presupone beneficios económicos que, a su vez, favorecerían las condiciones de las poblaciones con la necesidad de satisfacer sus requerimientos de agua potable.
2. La confección del biofiltro permitió evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua.
3. La selección de la arena sílice, la arena con saneamiento Arimao y la zeolita permitieron la biofiltración a partir de una granulometría entre 2.0 y 5.0 mm lo que está en consecuencia con lo planteado por las bibliografías y trabajos internacionales.
4. Los resultados físicos químicos y microbiológicos indican que el tratamiento de agua por biofiltros retiene los contaminantes, reduciéndoles y manteniendo las concentraciones dentro de los valores que dicta las Normas Cubanas 827/12, 27/99 y 1048/14 para agua de potable y riego.
5. La temperatura del agua disminuyó desde 26 – 21°C permitiendo mejorar la calidad del agua, el DQO<sub>5</sub> comenzó a variar moderadamente desde 1381 a 479 siendo menor que lo normado por la NC que, lo limita a <700 mg/L. los sólidos totales mantienen una tendencia a disminuir desordenadamente desde 3311 a 968 por debajo del límite aceptado por las NC en un período de 24 horas.
6. El DBO realiza una disminución poco acelerada debido a que el filtro necesita una estabilización de al menos 15 días reportada en la bibliografía revisada en este trabajo, la disminución es notoria desde 898 mg/L en 4 horas a 506 mg/L en 24.
7. La eficiencia de la remoción del DBO<sub>5</sub> fue significativa ya que se mantuvo por encima del 10 % hasta alcanzar el 71,2 % en 24 horas.
8. Se recomienda realizar la desinfección por cloro debido a que las aguas están en los límites establecidos por las NC agua potable.

9. Los sistemas de tratamiento de aguas potables por biofiltros rápidos permiten disminuir la carga contaminante del agua y aumentan la eficiencia a medida que es filtrada permitiendo el aumento de la calidad con que el líquido llega a los consumidores.

## **Recomendaciones.**

- ♣ Se recomienda realizar la estabilización del biofiltro por aproximadamente 15 días, previa la biofiltración del agua residual a ser tratada.
- ♣ Es recomendable un mantenimiento regular de la turba para un correcto funcionamiento con este material biológico, con el cambio de la capa a los 3 meses de uso continuo del material de filtración.
- ♣ Se debe colocar una capa de distribución de caudal, antes del contacto del agua residual con la capa de filtración; esta capa puede ser de materiales renovables como trozos de maderas, fibras naturales o materiales plásticos que permitan una correcta distribución del caudal de entrada del agua
- ♣ Se debe realizar un estudio de la eficiencia en la descontaminación de las aguas residuales domésticas con el uso de la turba como material de biofiltración; ya que las propiedades de la turba se prestan para un buen desempeño en cuanto al tratamiento del agua residual doméstico.
- ♣ Es necesario investigar, en cuanto al uso de materiales alternativos y de bajo costo para la depuración de agua residuales industriales.
- ♣ Para un mejor rendimiento del biofiltro es necesario realizar una investigación con materiales adicionales de tratamiento, que ayuden a descontaminar de una manera más eficiente el agua.
- ♣ Ejecutar la propuesta del biofiltro con el fin de eliminar los metales pesados en el agua destinada al consumo de los pobladores.

## **Bibliografía**

Aguiar Hernández, D., & Pórtela Cuevas, W. (2009). *Diseño y montaje del laboratorio de filtro lento de arena para agua potable*. Girardot, Colombia.

Alcaldía de María La Baja. (2001). Plan de Ordenamiento Territorial de María La Baja 2001 - 2009. María La Baja, Bolívar, Colombia.

Arboleda Valencia, J. (1975). *Teoría de la filtración del agua*. Lima, Perú: CEPI.

Ayuda en Acción Colombia & Corporación Desarrollo Solidario. (2015). *Nota conceptual: Agua Potable y Organización comunitaria para la población rural del norte del departamento de Bolívar Colombia*. Colombia.

Barrenecha, A., & De Vargas, L. (2004). Capítulo 10: Desinfección. En *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida* (págs. 155-213). Lima: CEPIS, OPS.

Barrientos Echegaray, H., Tello Yarin, J., Tito Pacheco, C., & Palomino Gamarra, M. (2009). *Purificación de agua por medio de filtros lentos de arena en la comunidad de Kuychiro - Cusco*. Cusco, Perú.

Blacio Ordóñez, D., & Palacios Pérez, J. (2011). *Filtros biológicos para la potabilización del agua, posibilidades de uso de FLA (filtros lentos de arena) con agua superficial de nuestra región*. Cuenca, Ecuador: Tesis de Pregrado de la Universidad de Cuenca.

Canal Voluntarios. (2015). *Memoria del proyecto: Convocatoria de ayudas 2015 para actuaciones de cooperación al desarrollo en agua y saneamiento de Cana Isabel II*. Madrid, España.

Cánepa, L. (Junio de 1992). *Filtración Lenta: Teoría y Evaluación*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Cánepa, L. (1994). *Filtración lenta como proceso de desinfección*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Caro, D., Aguirre, A., Vallejo, D., & Quiroga, C. (18 de Septiembre de 2015). *Distrito de Riego de Maríalabaja Agua y Tierra: Un problema de todos*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016,

<http://montesdemariamitierramididad.blogspot.com.co/2015/09/distrito-de-iegodemarialabajaaguayhtml>

- BAREÑO, I. R. 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*. grado, UNIVERSIDAD LIBRE.
- CANOSA, E. M. 2014. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS HIDRAULICOS DE LA ZEOLITA NATURAL CUBANA COMO MATERIAL FILTRANTE. *Revista de Ingeniería*, 8.
- CAROLINA MERCADO, E. L. 2015. EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESALINIZACIÓN SOLAR, TIPO CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO DE AGUA DE MAR. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 19/27.
- CAWST 2008. MANUAL DEL FILTRO BIOARENA. *Water and sanitation technology*.
- CUBA, P. C. D. 2016. Lineamientos de política económica y social del Partido y la Revolución para el periodo 2016-2021.
- DANILO AGUIAR HERNÁNDEZ, Y. W. P. C. 2009. Diseño y montaje del laboratorio de filtro lento de arena para agua potable.
- OPS 2005. *GUÍA PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS*, Lima.
- PAREDES, D. A. P. 2010. *BIOFILTRACIÓN SOBRE CAMA DE TURBA, PARA EL TRATAMIENTO SOBRE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL LAVADO DE JEANS*. TÍTULO DE INGENIERO CIVIL, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.
- POPULAR, A. N. D. P. 2018. Ley de Agua *In: INRH (ed.)*. CUBA ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR.
- SALUD, O. P. D. 2005. *GUÍA PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS*. Lima: UNATSABAR
- SANCHEZ, J. 2014. Ley de darcy.
- VILLABONA, J. P. Y. 2007. *Mejoramiento de la calidad del agua*. Ingeniero Hidráulico, José Antonio Echeverría (CUJAE).

# ANEXOS

## Anexo 1

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS				103-MOD-10/01
	Modelo para la determinación de la permeabilidad a carga constante				Febrero/11
	Permeámetro combinado				Revisión 0
Obra:	Yuliet		Registro:		
Cala:		Muestra:		Profundidad:	-
Cilindro:	4	Operador:	Olga R	Calculó:	Yoan Cortiña
Revisor:	Yalili Muñiz		Fecha:	24/03/2011	
Humedad inicial		Altura del cilindro (cm)		17,50	
Pesa filtro	4	23	Diámetro del cilindro (cm)		6,33
Masa húmeda	82,9	78,7	Profundidad piedra superior (cm)		1,20
Masa seca	82,0	78,0	Espesor dos piedras porosas (cm)		2,55
Tara	25,1	25,0	Longitud de la muestra(cm)		13,75
Humedad	1,6	1,3	Área de la muestra (cm <sup>2</sup> )		31,45
Humedad prom	1,5		Volumen de la muestra (cm <sup>3</sup> )		432,49
Masa seca(g)	452,6		Masa total(g)		2109,8
Densidad seca	1,047		Masa del cilindro y		1650,6
Masa húmeda(g)	459,2		masa dos piedras porosas (g)		
Densidad húmeda	1,062		Peso específico		2,50
Relación de vacíos	1,389		Distancia nivel sup a la salida (cm)		25,0
Temperatura del agua (°C)	26,5		Viscosidad del agua		0,85
Prueba No	Volumen de agua (cc)		Tiempo(s)	k(cm/s)	
1	60		10,22	0,103	
2	56		10,00	0,098	
3	57		10,00	0,100	
4	29		5,00	0,101	

5	39	7,00	0,097
6	54	10,00	0,094
7	79	15,00	0,092
8	78	15,00	0,091
9	82	16,00	0,090
10	51	11,00	0,081
Observaciones:		k (cm/s)	0,095
		k <sub>20°</sub> (cm/s)	0,081

## Anexo 2 Informe de ensayo



LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS

103-IS-02

INFORME DE ENSAYO N°: -

Denominación del ensayo: Determinación de la granulometría de los suelos  
 Obra: Zeolita Universidad  
 Nombre y dirección del cliente: IPH VC (cliente interno)  
 Método: Para las partíc. mayores de 75 mm, tamizado y para menores sedimentación

Anexos: 2

Documentos utilizados: NC 20:1999

Elaborado por: Adonis Ortega  
 Nombre y apellidos: Ramírez  
 Cargo: Téc. de proyecto e ingeniería

Firma

Aprobado por: Yalili Muñiz-Bueno  
 Cargo: Especialista Principal

Firma

Nombre y apellidos Cargo



Fecha de emisión: 04/06/2018

Cuño

<b>Resultados de los Ensayos</b>								
<b>Registro</b>	<b>Anexo</b>	<b>Cala</b>	<b>Muestra</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Grava</b>	<b>Arena</b>	<b>Limo</b>	<b>Arcilla</b>
-	Anexo 1	-	I	-	0	94	4	2
-	Anexo 2	-	II	-	1	93	3	3

Los instrumentos utilizados son trazables a los del Servicio Nacional de Metrología o laboratorios de calibración con trazabilidad demostrada a patrones nacionales en el SI.

Se Prohíbe la reproducción parcial de este documento sin la autorización expresa del laboratorio emisor.

Ave. Libertadores N°201 e/ Danielito y Jesús Menéndez. Santa Clara Villa Clara. Telf: 206028/29;

214283/85 Fax:202330 E-mail: eiphvc@enet.cu





