

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
**Validación de filtro de arena de capas múltiples para tratamiento de
agua para consumo**

Estudiante

Sol Noelia Martinez Armijos

Asesores

Erika Tenorio, M.Sc.

Ana Rut Benitez, M.Sc.

Jacob Vásquez, Mtr.

Honduras, agosto 2021

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA MARGARITA MAIER

Vicepresidenta y Decana Académica

ERIKA TENORIO MONCADA

Directora Departamento Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos	7
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos.....	15
Análisis de Diseños de Filtros Lentos de Arena Basado en Investigaciones Existentes.....	15
Construcción de los Filtros.....	16
Arena.....	18
Grava.....	18
Zeolita	19
Carbón Activado.....	19
Ensayo de Filtración	21
Análisis de Agua	23
Análisis Estadístico	25
Eficiencia de Remoción de Parámetros de Calidad de Agua Mediante Investigaciones Existentes.....	26
Velocidad de Filtración.....	35
Eficiencia de Remoción Bajo Dos Rangos de Turbidez	38

Parámetro de Calidad: Turbidez	38
Parámetro de Calidad: Color	42
Parámetro de Calidad: Potencial de Hidrogeno	45
Parámetro de Calidad: Conductividad Eléctrica	46
Parámetro de Calidad: Sólidos Totales Disueltos	47
Conclusiones	53
Recomendaciones	54
Referencias	55
Anexos.....	61

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Criterio del diseño de los filtros.....	20
Cuadro 2 Resumen de la revisión de estudios de filtros lentos de arena con diferentes sustratos y medidas.....	30
Cuadro 3 Eficiencia de remoción para turbidez en los filtros 1 y 2 en rangos de 60 - 70 UNT y 210 - 230 UNT	39
Cuadro 4 Eficiencia de remoción para color aparente en los filtros 1 y2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT	43
Cuadro 5 pH en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT.	46
Cuadro 6 Conductividad eléctrica en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT.....	47
Cuadro 7 Eficiencia de remoción para sólidos totales disueltos en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT.	48
Cuadro 8 Descripción de los parámetros de calidad de los filtros 1 y 2 en un rango de 60-70 UNT...49	
Cuadro 9 Descripción de los parámetros de calidad de agua de los filtros 1 y2 en un rango de 210-230 UNT.	50
Cuadro 10 Descripción de pH de los filtros 1 y 2 en rangos de turbidez de 60-70 UNT y 210-230 UNT.	51
Cuadro 11 Comparación de medias entre el filtro 1 y 2 en rangos de turbidez de 60-70 UNT y 210-230 UNT.	51

Índice de Figuras

Figura 1 Vista externa del diseño de los filtros	17
Figura 2 Esquema de diseño de filtro de agua	18
Figura 3 Representación de la estructura de los filtros 1 y 2, respectivamente.....	21
Figura 4 Velocidad de filtración promedio del filtro 1 y 2 a un rango de turbidez de 60 - 70 UNT.....	36
Figura 5 Velocidad de filtración promedio del filtro 1 y 2 a un rango de turbidez de 210 - 230 UNT..	37
Figura 6 Reducción de turbidez con el transcurso de tiempo en horas para el filtro 1 y 2 en un rango de 60 - 70 UNT.	40
Figura 7 Reducción de turbidez con el transcurso de tiempo en horas para el filtro 1 y 2 en un rango de 210-230 UNT.	42
Figura 8 Efecto del color aparente con respecto al tiempo de filtración para el filtro 1 y 2 en un rango de 60-70 UNT.	44
Figura 9 Efecto del color aparente con respecto al tiempo de filtración para el filtro 1 y 2 en un rango de 210-230 UNT.	45

Índice de Anexos

Anexo A Litros que entran y bajan del filtro, tiempo de filtración, caudal de salida y velocidad de filtración a un rango de turbidez de 60-70 UNT.	61
Anexo B Litros que entran y bajan del filtro, tiempo de filtración, caudal de salida y velocidad de filtración a un rango de turbidez de 210-230 UNT.	63
Anexo C Lijar tubos cuadrados de metal	65
Anexo D Tamizado de arena fina, arena gruesa y grava.	66
Anexo E Pintado de la estructura donde se colocaron los recipientes de plástico.	67
Anexo F Colocación de los sustratos dentro de los filtros.	68
Anexo G Instalación de los filtros con su respectiva estructura dentro del laboratorio del departamento de Ambiente y Desarrollo.	69
Anexo H Recolección del agua en el río del Yeguaré.	70
Anexo I Supervisión del filtro 1 en caso de rebalse.	71
Anexo J Paso del agua cruda a través de los filtros.	72
Anexo K Utilización del multiparámetro en las muestras de agua	73
Anexo L Llenado de celdas.	74
Anexo M Análisis de turbidez	75
Anexo N Primera recolección proveniente del río del Yeguaré.	76
Anexo O Segunda recolección proveniente del río del Yeguaré.	77
Anexo P Muestras de la primera repetición a un rango de turbidez de 60-70 UNT.	78
Anexo Q Muestras de la segunda repetición a un rango de turbidez de 60-70 UNT.	79
Anexo R Muestras de la tercera repetición a un rango de turbidez de 60-70 UNT.	80
Anexo S Muestras de la primera repetición a un rango de turbidez de 210-230 UNT.	81
Anexo T Muestras de la segunda repetición a un rango de turbidez de 210-230 UNT.	82
Anexo U Muestras de la tercera repetición a un rango de turbidez de 210-230 UNT.	83

Anexo V Representación de rebalse en el filtro 1.....	84
Anexo W Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para rango de turbidez de 60-70 UNT.....	85
Anexo X Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para un rango de turbidez de 210-230 UNT	86

Resumen

El agua es considerada de vital importancia para el ser humano, puesto que previene enfermedades y suple necesidades fisiológicas. Sin embargo, puede tener un efecto adverso cuando se perturban sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Frente a estos problemas se empleó un método de purificación del agua que es el filtro lento de arena. Estos tipos de filtros buscan ser una opción técnica, social, económica y viable para su purificación sobre todo en zonas rurales. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un modelo de filtro lento de arena de construcción casera con el fin de tratar agua para usos domésticos. Se construyeron dos filtros lentos de arena con diferentes posiciones de sustratos en su estructura. Se midió la velocidad de filtración y se evaluó la eficiencia de remoción de parámetros de calidad como turbidez, color, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos bajo dos rangos de turbidez de 60-70 UNT y 210-230 UNT. Se aplicó un análisis estadístico descriptivo y una prueba t para comparar eficiencias obtenidas mediante los arreglos de medios filtrantes. Como resultado se obtuvieron velocidades óptimas de filtración en los dos filtros oscilando entre $1-2 \text{ L}/\text{min}^{-1}\text{m}^{-2}$. En cuanto a eficiencia de remoción fue de 30% para turbidez de 60-70 UNT y 70% para turbidez de 210-230 UNT. Sin embargo, no cumplen con estándares de calidad para consumo humano.

Palabras clave: Eficiencia de remoción, Filtro de arena, Velocidad de filtración.

Abstract

Honduras has 87.2% of the population without access to water sources and 86.9% to sanitation. Water is considered of vital importance for the human being since it avoids the prevention of diseases and supplies physiological needs. However, it can have an adverse effect when its physical, chemical, and biological properties are disturbed. Faced with these problems, a water purification method was used, which is the slow sand filter. These types of filters seek to be a technical, social, economic, health, sustainable and viable option for purification, especially in rural areas. The present study aimed to evaluate the performance of a homemade slow sand filter model to treat water for domestic uses. Two slow sand filters with different substrate positions were built in their structure. Filtration rate was measured and the removal efficiency of quality parameters such as turbidity, color, pH, electrical conductivity, and total dissolved solids was evaluated under two turbidity ranges of 60-70 UNT and 210-230 UNT. A descriptive statistical analysis and a t-test were applied to compare efficiencies obtained by the filter media arrangements. As a result, optimal filtration rates were obtained in the two filters ranging from 1-2 L/min⁻¹m⁻². In terms of removal efficiency, it was 30% for turbidity of 60-70 UNT and 70% for turbidity of 210-230 UNT. However, they do not meet quality standards for human consumption.

Keywords: filtration speed, Slow sand filter, Removal efficiency.

Introducción

La salud humana y el desarrollo socioeconómico dependen del acceso a servicios básicos, entre ellos, el agua potable. Sin embargo, a nivel mundial se ha registrado 2.400 mil millones de personas que carecen un acceso de agua fija y saneamiento adecuado. De esta cifra 2.200 millones de personas en países en vía de desarrollo mueren por enfermedades asociadas al deficiente saneamiento del agua (Fernández y Mortier, 2005). En América Latina y el Caribe, la seguridad hídrica está relacionada con la satisfacción a través del acceso al agua de toda la población. Se considera que los problemas más serios en el suministro lo sufren la población de ciudades medianas y pequeñas, donde tienen servicios de agua y saneamiento por debajo de las normativas de calidad de agua establecidas (Ballesteros et al., 2015).

Honduras cuenta con hogares que no tienen un acceso a fuentes de agua y saneamiento. Para el año 2012, el 87.2% de la población tuvo acceso al agua y el 86.9% a saneamiento de esta, según cifras del Instituto Nacional de Estadística (LaFleur, 2014). Cerca de 700,000 hondureños no cuentan con servicios de agua mejorada y 1,500 millones no se benefician de servicios de saneamiento y con esto en accesibilidad, disponibilidad y calidad. Las personas que viven en zonas rurales son las más afectadas, donde el 86% de la población no tienen acceso a los servicios mejorados del agua y el 58% no tienen un acceso de saneamiento (Smits, 2017).

El agua es considerada de vital importancia para el ser humano, ya que ayuda a eliminar sustancias producidas por procesos bioquímicos en el organismo. Las fuentes de agua que normalmente abastecen a las poblaciones son de lluvia, aguas superficiales o subterráneas (Chulluncuy-Camacho, 2011). Las personas usan el agua para varias actividades de consumo, o usos domésticos para el hogar. Se considera que una persona tiene un adecuado acceso al agua si dispone de al menos 20 L de agua para consumo por persona al día (C. Torres y Villanueva, 2014).

La calidad del agua puede verse afectada por diferentes actividades humanas, agrícolas e industriales, que resultan nocivas para su consumo, de modo que, si existe un grado de

contaminación, no se puede utilizar en su estado natural. Cuando se perturban las propiedades químicas, físicas o biológicas de su composición es cuando se produce la contaminación del agua, la cual, puede generar efectos negativos en la salud de las personas en periodos previsibles de tiempo. Los factores que causan contaminación en el agua son agentes patógenos, desechos que necesitan oxígeno, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, nutrientes vegetales que provocan el crecimiento de plantas acuáticas, sedimentos, sólidos suspendidos, sustancias radiactivas y el calor (Aguilar y Portela, 2009).

El agua tiene estándares mínimos de calidad que se exigen para distintas aplicaciones donde su destino es el consumo humano. En general, los agentes químicos y radioactivos, a dosis elevadas pueden causar cuadros agudas gastrointestinales o neurológicos y muertes. En dosis bajas, producen efectos a largo plazo y son más difíciles de medir (Carvajal et al., 2019). Es por esto, que es necesario que el agua cruda se someta a tratamientos antes de ser utilizada donde se busca una remoción total o parcial de impurezas (Rosario y Broncano, 2017). Para ello se han diseñado distintos tratamientos para mejorar la calidad de agua, por ejemplo, la sedimentación, filtración y desinfección. Los últimos dos métodos se pueden utilizar a nivel comunitario (Conant, 2005).

El método más común de desinfección a nivel domiciliario es el hervidor de agua que alcanza un punto de ebullición entre los 90 a 100 °C. Este método no supone una purificación del agua en su totalidad, pues algunos microorganismos facultativos sobreviven más allá de ese punto de ebullición (C. Torres y Villanueva, 2014). Frente a problemas de contaminación de agua, el uso de filtros de agua puede representar muchos beneficios para el ser humano. Estos son de fácil mantenimiento y mayor accesibilidad, siendo un medio de ayuda para las poblaciones vulnerables frente a limitaciones económicas y educativas.

El filtro es un instrumento de tratamiento para uso individual, donde el agua puede recolectarse de un río, arroyo o pozo. Su uso depende completamente del morador, y no requiere un apoyo comunitario o grupo de personas. Esta tecnología es adecuada para los países en vía de

desarrollo que regularmente no tienen procesos reglamentarios que se necesitan para la construcción de sistemas multifamiliares eficaces (Aguilar y Portela, 2009). Es considerada como una opción técnica, social, económica, sanitaria, sostenible y viable para la potabilización de agua sobre todo en zonas rurales (W. Aguilar, 2019).

Esta investigación en cuanto al tratamiento de aguas por medio de filtro lento de arena se relaciona con el ODS 6, donde se debe garantizar el acceso al agua y saneamiento para todos los fines y personas al 2030. La meta 6.3 de este objetivo dirige su atención a “mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos” (Monteza, 2020).

En décadas recientes las agencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y el sector privado ha innovado el tratamiento de agua para el consumo de uso doméstico donde se tienen soluciones de fácil acceso, de operación y algunos de bajo costo (Avila y Figueroa, 2009). Se ha establecido que el filtro de agua es un aparato que contiene capas de materiales que están sobrepuestos entre sí y que generalmente son minerales que se encuentran de forma natural, donde su función principal es la purificación de cierto porcentaje de agua. En estos procesos de filtrado, se busca la retención de sólidos en las capas, las cuales tienen como característica una textura porosa para la filtración de agua retención de partículas sólidas, como arena, el barro, oxido, polvo, hierro o altas cantidades de cloro y bacterias que contaminan el recurso (Cedeño, 2018).

Existen dos tipos de filtración de arena, rápida y lenta. El filtro de arena rápido, el cual contiene arena gruesa u otro medio de filtración de modo que el agua pase a alta velocidad y baja presión (W. Aguilar, 2019). El filtro lento de arena es un proceso que puede operar de forma natural sin la necesidad de agregar alguna sustancia química. Sin embargo, requiere de un buen diseño, operación y mantenimiento para que no afecte el mecanismo de remoción microbiológica del filtro (W. Aguilar, 2019). Para esta investigación se hizo uso de la filtración lenta, ya que no se requiere producir grandes cantidades de agua y son de un bajo costo al solo fluir el agua por gravedad (Acosta y Calvo, 2006).

En cuerpos de agua naturales refleja la presencia de moléculas orgánicas que se derivan de diferentes materiales vegetales como turba, hojas, ramas, etc. También, puede ser aumentado por materia orgánica en suspensión (Martínez, 2018). El color también puede deberse a la contaminación por efluentes industriales, donde se ha comprobado que por acción del cloro como desinfectante puede dar origen a trihalometanos. Por otro lado, la turbidez se da por la presencia de partículas en suspensión, donde la medida aceptable en agua para consumo humano es de cinco unidades nefelométricas de turbidez. Sin embargo, es recomendable que se mantenga lo más bajo posible por los efectos microbiológicos (W. Aguilar, 2019).

En el año 2019, se desarrolló un prototipo de filtro de arena lento con estudiantes en el módulo de Innovación Tecnológica de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Para la construcción de este filtro, estudiantes de último año se basaron en diseños existentes y se adaptó para implementarlos en zonas rurales. Los materiales que se usaron fueron: arena zeolita, carbón activado, arena fina y arena gruesa, respectivamente. El filtro estuvo construido con materiales de fácil acceso y económicos, ya que atiende a la necesidad de personas con escasos recursos económicos. Con el propósito de reducir el riesgo de enfermedades gastrointestinales por el consumo de agua en condiciones de contaminación disminuyendo la turbidez en el agua y parámetros físico-químicos (Gutiérrez et al., 2019).

El objetivo general del estudio fue: evaluar el desempeño de filtros lentos de arena de construcción casera con el fin de tratar agua para usos domésticos. Los objetivos específicos fueron:

Documentar la eficiencia de remoción de parámetros de calidad de agua de diferentes diseños de filtros lentos de arena con base en revisión de literatura existente.

Comparar la eficiencia de remoción de turbidez y color de un modelo filtro lento de arena con dos arreglos de medios filtrantes y en dos rangos de turbidez.

Medir la velocidad de filtración en el filtro bajo los dos arreglos de medios filtrantes y en dos rangos de turbidez.

Materiales y Métodos

Para el estudio se tomó el agua del río Yeguaré, en el margen donde colinda con la Unidad de Suelos, ubicada dentro de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (Anexo H). Se localiza en el departamento de Francisco Morazán, Municipio de San Antonio de Oriente, Honduras en el km 30 de la carretera Tegucigalpa-Danlí. Está clasificada como un clima tropical seco (Caal, 2013). Geográficamente se encuentra entre las coordenadas 13°55'N y 14°02'N y 86°56'O y 87°03'O. Tiene una temperatura promedio de 25 °C, una altura que está entre los 800-880 msnm y una precipitación anual promedio de 1,100 mm (Bertrand, 2008). El agua se recolectó de esta zona para evidenciar el estado del agua bajo diferentes condiciones de precipitación y poder con datos reales los cuales simulen a condiciones para ríos en comunidades rurales en Honduras.

Análisis de Diseños de Filtros Lentos de Arena Basado en Investigaciones Existentes

Para entender mejor el diseño de los filtros y los materiales que se utilizaron se buscó investigaciones existentes donde se recopiló evidencia de la eficiencia de remoción de contaminantes por medio de filtros lentos de arena a través de una revisión de literatura. A partir de la información obtenida se analizó el funcionamiento y operación de estos sistemas para provocar una remoción de contaminantes a través de los sustratos colocados dentro de sus estructuras. Además, estos diseños se los comparó con los filtros 1 y 2 construidos para esta investigación, donde se determinó si hay factores en cuanto a los medios utilizados o el tamaño de los diseños para obtener resultados de eficiencia similares o diferentes. La búsqueda de información se realizó a través de Google académico y Science Direct recopilando información a través de diferente base de datos, principalmente de información primaria y secundaria como tesis realizadas anteriores por diferentes universidades y artículos de revisión. Se consideró la selección de publicaciones que oscilaban entre años de 2006-2022, ya que, a partir de estos años es donde se encontró información sobre parámetros físicoquímicos implementados para filtros lentos de arena.

Para esta revisión de literatura solo se tomó en cuenta, el tema, autor, tamaño del filtro diseñado en cuanto a su diámetro y altura y los parámetros de calidad de agua analizados en los valores iniciales y final. Además, se incluyó su eficiencia de remoción. Estos sirvieron como referencia a tomar en el diseño y estructura de los filtros, además de los materiales implementados en otras investigaciones, lo cual, podría representar diferencias en los resultados.

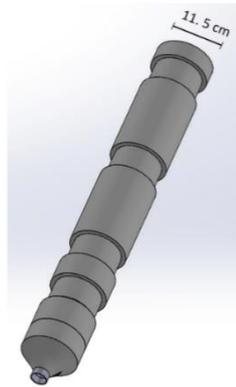
Construcción de los Filtros

El presente estudio requirió la construcción y puesta en marcha de dos filtros lentos de arena, en el cual, constó de diferentes etapas. Para la construcción de la estructura en que se evaluaron los filtros, se consideraron características de fácil construcción, manipulación y ahorro de espacio. Esta etapa se la dividió en tres partes de construcción, la primera fueron los filtros. El esqueleto del filtro fue construido con tubos PVC desarmables hembras y machos de 11.5 cm de diámetro y 12 cm de altura con forma cilíndrica. Para fijar las piezas macho con hembra se le ubicó un tubo reductor de 12 cm de altura (Figura 1). Posteriormente, la unión de las piezas fue por medio de las roscas de las piezas, las cuales, fueron aseguradas con malla con el mismo diámetro de las piezas hembras y machos y reforzado de teflón, lo que les permitió ser desarmables, evitar fugas y mezclar el material. Estas piezas fueron reforzadas con silicón y así prevenir posibles derrames de agua fuera de su estructura.

En la parte inferior del filtro se le colocó un tapón PVC con 12 cm de altura, el cual contenía una boquilla para que el agua pudiera fluir hacia un recipiente de almacenamiento. Para la introducción de la boquilla se le perforó un agujero en el centro, por lo que fue reforzada con silicón y teflón, impidiendo su movilidad y mezcla de los materiales filtrantes por fugas. Finalmente, se le incluyó una prensa metálica con tornillos, en el que puede ser colocado en cualquier parte de su estructura externa dependiendo de la altura de la persona que lo quiera emplear.

Figura 1

Vista externa del diseño de los filtros



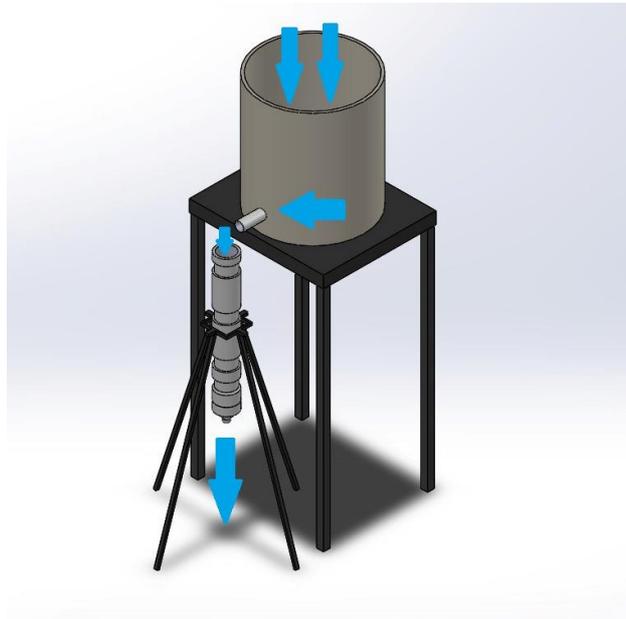
La estructura para sostén del filtro fue construida con tubos cuadrados de metal, cuyo propósito fue para que el filtro no toque el suelo y se pudiera recolectar el agua filtrada en una cubeta de plástico ubicado en la superficie. La base contó con una altura de 105 cm, el cuadro de metal que sostiene el filtro tuvo una medida interna de 14.5 cm y externa de 18.5 cm. Para sujetar de una mejor manera al filtro se soldó una base circular de varilla lisa de 2 mm con una medida de 14 cm y sostenida por pedazos de 2 cm de la misma varilla. De modo que, pudieran ser sujetados estos cuadros de base se diseñaron cuatro patas con un largo de 105 cm cada una, las cuales tuvieron un ángulo de 8°, en el que, creó una abertura teniendo una distancia entre las patas de 40 cm. El objetivo de estas medidas de abertura fue para colocar las cubetas en la superficie y que este pueda recoger el agua filtrada y al mismo tiempo que no derrape.

Para colocar el agua cruda a filtrar se utilizó dos recipientes de plástico blancos para cada filtro. Cada recipiente fue rotulado en la parte externa de su estructura con las medidas en litros que sirvieron como guía para poder saber cuántos se estuvieron filtrando. Además, contaron con una abertura en la parte inferior, donde se les colocó un grifo para que el agua pudiera ser regulada. Para la colocar los recipientes de agua en la parte superior de los filtros, se construyó una estructura con tubos cuadrados de metal. Las medidas de la estructura fueron de 1.50 m de altura y un rectángulo de 60 × 20 cm como base para colocar los recipientes que contenían el agua a filtrar (Figura 2). El filtro

numero 1 fue estándar para el diseño y estructura del filtro 2. Sin embargo, cada uno de ellos fue configurado diferente con los medios filtrantes internos. Los medios filtrantes fueron:

Figura 2

Esquema de diseño de filtro de agua.



Arena

Es la unión de fragmentos sueltos de roca y minerales que resulta del proceso de erosión de estos materiales con el paso de los años (Cedeño, 2018). La arena que es usada en los filtros lentos debe tener un tamaño efectivo de 0.15 - 0.30 cm. Debe de estar libre de arcilla, tierra y materia orgánica (Cordero y Ullauri, 2011). Por su forma, facilita la retención de sólidos suspendidos, donde retiene la mayoría de las impurezas que puede traer el agua, incluyendo materia orgánica (Botero, 2020).

Grava

Está conformada por fragmentos de roca en forma redondeada que han sido resistentes al proceso de erosión, transporte y sedimentación. Llegan a medir de 0.20 - 0.64 cm de diámetro. Pueden utilizarse en capas de filtro por tener un buen comportamiento, con una ligera compactación y con zanjas drenantes. El mecanismo de remoción de los sólidos para las gravas tiene una naturaleza

diferente, en el que participan las fuerzas de cohesión entre el material y las partículas suspendida (Toapanta, 2018).

Zeolita

Es un adsorbente natural de alta capacidad. Tiende a producir una mayor claridad en agua filtrada y tiene una durabilidad de hasta más de 5 años. Además, por la porosidad de este sustrato el agua fluye con una mayor facilidad (Larrea, 2015). Este mineral se lo conoce por diversos usos en industrias y comercialmente (Anchundia y Segarra, 2017).

Carbón Activado

Está conformado por diferentes materiales que se diferencian por su estructura interna, distribución en poros, superficie específica y granulometría. Se compone por tener 75 a 80% de carbono y de 5 a 10% de cenizas. Como estructura física es de microcristalina de una distribución de tamaño de poros determinada (Chiclote, 2018). Entre las cualidades del carbón activado es la capacidad de retener causantes de color, olor y sabor en medios acuosos. Además, tiene la característica de ser de un bajo costo (Rossi, 2017).

Al momento de tener los dos prototipos de filtros construidos, se procedió a ubicar los sustratos en diferentes ubicaciones dependiendo del filtro. El orden de los sustratos puestos en los filtros fue el siguiente (Cuadro 1):

Filtro 1: Algodón, Carbón activado, zeolita, arena fina, arena gruesa.

Prototipo estándar.

Filtro 2: Algodón, Carbón activado, arena fina, arena gruesa, grava

El orden de sustratos utilizados en este filtro se basó en la investigación de Villanueva (2013), donde los sustratos que se usó fue arena fina, gruesa y grava. Dando resultados eficientes en cuanto a diferentes parámetros de calidad de agua.

La utilización de algodón para incluirla en los filtros se basó en el estudio de Zamora (2019), donde evaluó la calidad del agua de la Quebrada El Tambo usando filtro de antracita, algodón, arena

gruesa y caliza triturada, dando resultados eficientes. Además, este material evitó que los medios filtrantes como el carbón activado pudieran ser evacuados directamente en el agua filtrada, el cual, sería utilizada para analizar posteriormente. Este material, también ayudó en gran medida a retener una cantidad de partículas del agua de un menor tamaño, lo cual, es de gran ayuda para tener una mayor calidad del agua filtrada.

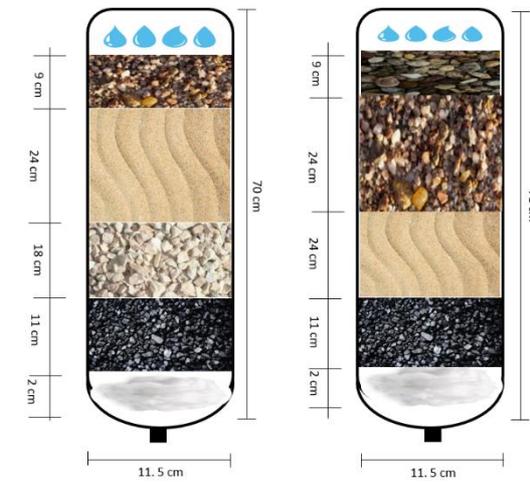
Cuadro 1

Criterio del diseño de los filtros

Especificación	Filtro 1	Filtro 2
Tamaño del filtro		
Altura	70 cm	71 cm
Diámetro	11.500 cm	11.500 cm
Medio del filtro		
Tipo del cuarto sustrato	Arena gruesa	Grava
Granulometría	0.5 cm	0.5-2 cm
Altura del cuarto sustrato	9 cm	9 cm
Tipo del tercer sustrato	Arena fina	Arena gruesa
Granulometría	0.2 cm	0.5 cm
Altura del tercer sustrato	24 cm	24 cm
Especificación		
Tipo del segundo sustrato	Zeolita	Arena fina
Granulometría	0.1 cm	0.2 cm
Altura del segundo sustrato	18 cm	24 cm
Tipo del primer sustrato	Carbón activado	Carbón activado
Granulometría	0.4 cm	0.4 cm
Altura del primer sustrato	11 cm	11 cm
	Algodón	Algodón
	2 cm	2 cm
Modo de operación		
Volumen de muestra del agua	9 L	9 L

Figura 3

Representación de la estructura de los filtros 1 y 2, respectivamente.



Ensayo de Filtración

Una persona consume 2 L de agua al día, esto es como un supuesto predeterminado en base a los valores de la Organización Mundial de la Salud con respecto al consumo de un adulto (Ginebra, 2011). Además, la cantidad de personas que integran en hogares en zonas rurales es de hasta cuatro personas por hogar (Figuerola, 2018). Esto da una suma total de 8 litros por familia al día, lo cual, es un sustento de recomendable para consumo humano. Sin embargo, se decidió filtrar 10 L por pérdidas de agua que ocurren al momento de filtrar, ya que los sustratos consumen el agua al adherirse en su estructura y resulta más favorable tener suficiente agua en caso de que se le quiera dar otros usos como el de cocinar alimentos.

Este proceso tuvo la finalidad de explicar la rapidez en que el consumidor puede obtener el agua del filtro en un tiempo determinado. Lo cual, permite a los integrantes de una familia gestionar en qué momento del día comenzar a filtrar el agua y, así mismo, cuando ya se haya completado el proceso poder consumirla. En estos experimentos realizados, a pesar de que, los recipientes de plástico tienen una capacidad de llenado con agua cruda de 10 L, el volumen de entrada de agua a los filtros fue en total de 9 L.

El Cálculo que se utilizó fue la ecuación de caudal, en el cual se mide el volumen del caudal (V) expresado en L/h por el tiempo estimado de salida de agua ya tratada (T) (Ecuación 1). Para valorar el tiempo se utilizó un cronómetro (K. Torres y Torres, 2019).

$$Q = \frac{V}{T} \quad [1]$$

También se tomó en cuenta la caracterización del filtro, en este caso, como es un filtro por gravedad o lento se debe conocer sus dimensiones para el gasto de agua. Aquí se tuvo en cuenta el caudal de agua que baja (Q), expresada en m³/h y el área de la estructura del filtro en el cual están ubicados los sustratos (A), expresada en m² para conocer la velocidad del paso del agua por los medios filtrantes. Por esto, se empleó la siguiente ecuación (Ecuación 2) (Toapanta, 2018).

$$\text{Velocidad de filtración} \left(\frac{m^3}{m^2h} \right) = \frac{(Q)}{(A)} \quad [2]$$

Se evaluaron dos rangos de turbidez. El parámetro de color igualmente estuvo involucrado, ya que, junto con la turbidez está relacionado por la carga de materia orgánica presente en el agua, e influye directamente en la eficiencia del tratamiento (Guzmán et al., 2015). Los rangos fueron:

La turbidez baja fue de 60 - 70 unidades nefelométricas de turbidez. Este rango resultó de la turbidez inicial del agua recogida del río.

La turbidez alta fue entre 210 - 230 unidades nefelométricas de turbidez. Este rango se eligió estimando la turbidez que se esperaría en eventos de alta precipitación y escorrentía en la zona.

Para lograr tener turbidez mayor de 200 UNT, se procedió a mezclar el agua cruda, el cual su turbidez inicial era baja, con la arcilla caolín marca MilliporeSigma. La preparación de la mezcla se basó en la investigación de Gómez (2010). Donde mezcló agua sintética con cinco gramos de caolín por 1 L de agua proveniente del grifo. Esta mezcla fue agitada por una hora a 200 revoluciones por minuto.

Este mismo método se utilizó para preparar el agua cruda proveniente del río Yeguaré, donde las mezclas se las realizaron en 1 L de agua cruda utilizando un matraz volumétrico y una capsula En

cuanto al rango de turbidez de 60 - 70 UNT no se necesitó mezclar el agua cruda con caolín, ya que la turbidez inicial del río oscilaba en estos valores cuando no se presentaban lluvias torrenciales o de larga prolongación.

La preparación para la creación de agua turbia en un rango de 210 - 230 UNT, se realizó mezclando el agua cruda proveniente del río del Yeguaré con los gramos de caolín necesarios para obtener la turbidez deseada. Para esto, se hicieron pruebas, que consistió en la preparación de pequeñas cantidades de gramos de caolín con el agua cruda inicial del río. La turbidez obtenida de estas mezclas, sirvieron de guía para preparar el agua con la cantidad de litros necesaria a filtrar en los dos tratamientos, siendo este un total de 24 L. Al tener dos recipientes de agua para cada tratamiento, se dividió 11.50 L de agua cruda del río para cada uno. Posteriormente, se vertió la mitad de la mezcla preparada para cada tratamiento, es decir, 0.50 L, dando como resultado 12 L para cada filtro.

Para medir la eficiencia de remoción de contaminantes en los diferentes rangos se usó la ecuación representada en porcentaje (K. Torres y Torres, 2019). A través de la siguiente Ecuación 3 se determinó la eficiencia de remoción de turbidez en las dos configuraciones de los filtros.

$$\text{Eficiencia de remocion (\%)}: \frac{X_{\text{inicial}} - X_{\text{final}}}{X_{\text{inicial}}} \times 100 \quad [3]$$

El muestreo de los filtros se realizó durante 5 días a la semana, donde se recolectó primero el agua en el lugar indicado para la toma de muestras, luego se midió la turbidez inicial del agua cruda. Para crear una turbidez alta se vertió la arcilla que posteriormente fue pasada por los filtros. Las muestras de agua fueron trasladadas al laboratorio para hacer los respectivos análisis.

Análisis de Agua

Para llevar a cabo el proceso de filtración del agua, se tomó una cantidad de 100 L recogidos en cinco botes de plástico en 3 días diferentes de la vertiente del río del Yeguaré. Dando una cantidad total de 300 L para toda la experimentación. A esta muestra se le aplicó arcilla caolín para conseguir

los rangos que se pretende evaluar en el filtro. La arcilla caolín es un aluminosilicatos hidratado por la descomposición de rocas feldespáticas, siendo un material muy versátil para diferentes usos industriales (Reyes, 2011).

Las muestras recolectadas del río para análisis fisicoquímico fueron por medio de botes de plástico. Estos fueron enjuagados tres veces consecutivas para la eliminación de partículas (O. Aguilar y Navarro, 2018). Se llevó un registro de cada muestra recolectada con una etiqueta inscrita, donde se colocó la fecha, nombre del recolector de la muestra, la hora, y la ubicación. Las muestras del río se tomaron debajo de la superficie en áreas donde no presentaban corrientes fuertes de agua y con la boca del bote dirigido hacia la corriente (Bridgewater, 2017). Al finalizar se llevó al laboratorio y se las mantuvieron en condiciones de ambiente, ya que los parámetros a evaluar son fisicoquímicos y las condiciones a las que fueron tomadas no varían.

Los parámetros de calidad de agua evaluados en este estudio fueron turbidez y color. La turbidez mide la dispersión de las partículas suspendidas en función al número, tamaño y forma que está en el agua al paso de la luz (Broncano y Rosario, 2017). El color indica la presencia de posibles sustancias orgánicas (Guzmán et al., 2015). El parámetro que se tomó en cuenta para los análisis fue color aparente. El cual, es el color del agua sin haber sido filtrada o centrifugada para la eliminación del material en la solución y en suspensión (Pérez, 2010).

Junto con esto, se tomaron en cuenta otros parámetros como indicadores del comportamiento de los parámetros centrales. Estos fueron: potencial de hidrogeno, que es la medida de la concentración de iones de hidrógeno, donde se determina la naturaleza ácida o básica de una solución (Rossi, 2017). Los rangos de pH para agua potable tienen que andar entre 6.5 y 8.5 (Rodríguez, 2009). La conductividad eléctrica del agua mide la capacidad de transportar la corriente eléctrica, la cual, esta expresada como microsiemens sobre centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Solís et al., 2018). Finalmente, se midió los sólidos totales disueltos los cuales son moléculas en forma molecular e ionizada disueltas en el agua. Esta se debe a la presencia de minerales, gases que son producto de la descomposición de la

materia orgánica, metales y compuestos químicos, que provocan olor, color y sabor (Toasa, 2012). Estos se midieron para conocer el efecto de la filtración en las características fisicoquímicas de las muestras.

Las mediciones se ejecutaron en el laboratorio de calidad de aguas en el Departamento de Ambiente y Desarrollo ubicado en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. El color se lo determinó mediante una comparación visual y un espectrofotómetro con unidades de mg/L platino-Cobalto (Bridgewater, 2017). Para turbidez se utilizó un turbidímetro marca "HACH®" cat No.2100 QISO1, donde se debe agitar tres veces la muestra en el envase para quitar las burbujas y asegurar que el instrumento esté calibrado. Para la obtención de los valores de temperatura, conductividad y pH se lo midió con un multiparámetro serie 35 marca "Oakton®" (Vásquez, 2021). En el caso de los tres últimos parámetros se usó un agitador magnético y capsulas magnéticas con el objetivo que las partículas no fueran sedimentadas.

Análisis Estadístico

El enfoque de esta investigación fue de tipo cuantitativo, ya que, consta de un análisis estadístico descriptivo e inferencial tomando los valores de la muestra general resultante de todos los litros filtrados. El primer análisis contiene la media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, valores mínimos y máximos, y error estándar. Para el segundo análisis se realizó una prueba t para muestras independientes con tres repeticiones. El propósito fue hallar diferencias entre tratamientos para eficiencia de remoción en parámetros de calidad de agua. Sin embargo, para comenzar con el análisis primero se realizó una prueba de normalidad de "Shapiro-wilks". Los análisis estadísticos se desarrollaron con la ayuda del programa estadístico "Infostat®" versión 2020, y el nivel de confianza que se utilizó para las pruebas fue del 95%.

Resultados y Discusión

Para que los medios se asienten en la superficie se les vertió pequeñas cantidades de agua para que los sustratos pudieran ser asentados en el filtro. Los filtros se ubicaron en el laboratorio de Ambiente y Desarrollo, donde fueron colocados en paralelo donde no se permitía su movilización.

Eficiencia de Remoción de Parámetros de Calidad de Agua Mediante Investigaciones Existentes

Por medio de la revisión de literatura de filtros diseñados en diferentes partes del mundo, se pudo comparar el funcionamiento de los filtros de esta investigación (Cuadro 2). Para la revisión se tomó en cuenta la posición de los minerales, la altura que ocupaban y sustratos utilizados en que diferentes autores diseñaron los filtros junto con el tamaño y diámetro de los filtros. Igualmente, se tomó en cuenta los parámetros analizados, donde variaron según el diseño planteado en cada investigación. La principal diferencia fue el tamaño en que se ubicaron los sustratos, en el que se aprecian mejores eficiencias en los parámetros de calidad cuando el filtro tiene un tamaño de diámetro mayor a los 30 cm. Por lo que, al compararlo con los filtros 1 y 2, se puede inferir que este aspecto de diseño tuvo una influencia para la remoción de contaminantes presentes en el agua. En el Cuadro 2 se presenta un resumen de los estudios afines al presente en cuanto a caracterización de desempeño de filtros caseros.

Cuadro 2*Resumen de la revisión de estudios de filtros lentos de arena con diferentes sustratos y medidas*

Investigación	Autor	Composición de los filtros	Capacidad del filtro	Altura de la estructura	Diámetro de la estructura	Parámetros de la calidad iniciales	Resultados	Eficiencia de remoción
Evaluación de la filtración lenta de arena para la potabilización del agua en el corregimiento de San José de Playón	Rivas y García (2016)	Grava: 3.81 cm Grava fina: 2.54 cm Arena: 19 cm.	Cada unidad de los filtros lentos de arena se conformó por dos recipientes de plástico. Capacidad del filtro: 30 L/día.	36.5 cm	30.5 cm	Turbidez: 16.63 UNT Color aparente: 195 UPC Coliformes totales: 3,100 UFC/100 mL. pH: 7.61	Turbidez: 2.41 UNT Color aparente: 58 UPC. Coliformes totales: 0 UFC/100 mg/L pH: 7.88	Turbidez: 85.51% Color aparente: 70.25% Coliformes totales: 100%
Eficiencia del tratamiento filtro lento de arena en la remoción de carga orgánica en efluentes del mercado de Flores, Barranco.	Moncada (2017)	Arena fina: 10 cm Arena gruesa: 15 cm Grava: 10 cm	20 L	45 cm	40 cm	DBO ₅ : 403.6 mg/L SST: 150 ppm Color: 550 mg Pt-Co C.E: 5087 µs/cm. pH: 7.23	DBO ₅ : 54.2 mg/L SST: 8 ppm Color: 215 mg Pt-Co C.E: 1670 µs/cm pH: 7.23	DBO ₅ : 86.57% SST: 94.67% Color: 60.91% C.E: 67.17%
Tratamiento y reúso de aguas grises mediante un filtro lento de arena	Valdez et al. (2018)	Arena fina: 5cm Arena gruesa: 5 cm Canto rodado: 15 cm	Se utilizó un tanque con una capacidad de 200 L	98 cm	59 cm	Turbidez: 180 UNT	Turbidez: 5 UNT	Turbidez: 97.22%

Investigación	Autor	Composición de los filtros	Capacidad del filtro	Altura de la estructura	Diámetro de la estructura	Parámetros de la calidad iniciales	Resultados	Eficiencia de remoción
Implementación de un sistema de filtración lenta de arena en comunidades vulnerables para mejorar la calidad de agua para consumo humano. Según la normatividad ambiental vigente y la vulnerabilidad de la vivienda.	Villanueva (2013)	Arena de peña: 40 cm Arena de río: 15 cm Grava: 15 cm	500 L	132 cm	88 cm	Color aparente: 30 mg Pt-Co Turbidez: 25 UNT C.E: 256 μ s/cm STD: 127.4 ppm pH: 6.5	Color aparente: 0 mg Pt-Co Turbidez: 1.47 UNT C.E: 216 μ s/cm STD: 108 ppm pH: 6.9	Color aparente: 100% Turbidez: 94.12% C.E: 15.63% STD: 15.22%
Mejora de la calidad del agua de río Cumbe empleando filtro de carbón activado.	Chiclote (2018)	Piedra grande: 25 cm Carbón activado: 30 cm Gravilla: 10 cm Grava: 25 cm	200 L	90 cm	60 cm	Turbidez: 5.61 UNT Coliformes totales: 9.2X10 ³ NMP/100 ml Coliformes fecales: 490 NMP/100 ml pH: 7.86	Turbidez: 3.74 UNT Coliformes totales: 3.5X10 ³ NMP/100 ml Coliformes fecales: 230 NMP/100 ml pH: 8.5	Turbidez: 33.33% Coliformes totales: 61.29% Coliformes fecales: 53.06%

Investigación	Autor	Composición de los filtros	Capacidad del filtro	Altura de la estructura	Diámetro de la estructura	Parámetros de la calidad iniciales	Resultados	Eficiencia de remoción
Remoción de arsénico del agua de consumo humano con filtros de clavos de hierro, fibra comercial, grava y arena.	Avilés et al. (2011)	Gravilla: 5 cm Grava: 15 cm Arena sílica: 10 cm Gravilla: 5 cm Grava: 7 cm	Se usaron dos que contaban con columnas de acrílico transparente con una capacidad de filtro de 28.8 L	Filtro 1: 14 cm Filtro 2: 42.5 cm	Filtro 1 y 2: 0.25 cm	Color verdadero: 7 mg Pt-Co. Turbidez: 5.06 UNT. C.E: 447 μ s/cm pH: 8.70	Color verdadero: 20 mg Pt-Co Turbidez: 9 UNT C.E: 424 μ s/cm pH: 8.55	Color verdadero: 0% Turbidez: 0% C.E: 5.15%
Efectividad del filtro de grava, sulfato de aluminio y carbón activado en la eliminación de detergentes de aguas residuales urbanas de la ciudad de Cajamarca	Mamani y Saucedo (2021)	Grava: 12 cm. Carbón activado: 250 gramos Algodón	20 L	32 cm	9 cm	Turbidez: 591.5 UNT pH: 8.44	Turbidez: 32.30 UNT pH: 8.03	Turbidez: 94.54%

Investigación	Autor	Composición de los filtros	Capacidad del filtro	Altura de la estructura	Diámetro de la estructura	Parámetros de la calidad iniciales	Resultados	Eficiencia de remoción
Propuesta de diseño y estudio de un filtro de grava para potabilizar el agua subterránea para el consumo en una finca ubicada en la vía Progreso-Playas.	Arias y Gonzabay (2022)	Arena: 12 cm Algodón: 2 cm Carbón activado: 8 cm Algodón: 2 cm Zeolita: 3 cm Algodón: 2cm Arena: 12 cm Algodón: 2cm Grava: 12 cm	Se utilizó un tanque cilíndrico vertical con una capacidad del filtro de 250 L	94 cm	56 cm	Color verdadero: 25 mg Pt-Co. Turbidez: 2.35 UNT. Sólidos disueltos: 763 mg/L pH: 7.04	Color verdadero: 32 mg Pt-Co Turbidez: <2.5 UNT Sólidos disueltos: 596 mg/L pH: 7.04	Color verdadero: 0% Turbidez: 0% Sólidos disueltos: 22.02%
Eliminación de impurezas fisicoquímicas y microbiológico del uso de agua modificada a un filtro casero.	Embialle et al. (2006)	Arena: 40 cm Ladrillo triturado: 10 cm Gravilla: 9 cm Piedra de drenaje: 10 cm	Tanque construido con piezas metálicas. Caudal volumétrico: 0.35 L/min	100 cm	30 cm	Turbidez: 64 UNT C.F: 1,800 NMP/100 ml pH: 6.8	Turbidez: 6.3 UNT C.F: 980 NMP/100 ml pH: 6.9	Turbidez: 90.16% C.F: 45.56%
Evaluación de filtros de carbón activado basado en cáscaras de frutas (piña, plátano, coco, naranja)	Arrocha et al. (2019)	Grava: 3.5 cm Arena: 5 cm Carbón de coco, Plátano, piña y naranja: 1.7 cm Arcilla: 1 cm Algodón: 3 cm	Se utilizó un vaso transparente de 20 oz.	-	-	Turbidez: 12.7 UNT	Turbidez Coco: 4.23 UNT Plátano: 0.63 UNT Naranja: 3.88 UNT Piña: 6.61 UNT	Turbidez Coco: 66.69% Plátano: 95.04% Naranja: 69.45%] Piña: 47.95%

Investigación	Autor	Composición de los filtros	Capacidad del filtro	Altura de la estructura	Diámetro de la estructura	Parámetros de la calidad iniciales	Resultados	Eficiencia de remoción
Purificación de aguas subterráneas por medio de filtros lentos de arena para consumo humano en la comunidad de Thunco-Puno	Carcausto (2017)	Carbón activado: 10 cm Arena fina: 20 cm Arena gruesa: 10 cm Grava: 10 cm	2.43 L	80 cm	-	Turbidez: 6.26 UNT S.T: 1310 mg/L C.E: 1879 μ s/cm C.T: 1100 NMP/100 ml pH: 7.82	Turbidez: 2 UNT S.T: 765 mg/L C.E: 1530 μ s/cm C.T: 2.2 NMP/100 ml pH: 8.60	Turbidez: 68.05% S.T: 41.60% C.E: 18.57% C.T: 99.80%
Optimización de la filtración lenta de arena	Muhammad et al. (1996)	Arena: 73 cm Grava: 40 cm	Caudal volumétrico: 0.5 L/min	262 cm	-	-	-	C.F: 96.70% C.T: 96.40% Turbidez: 87.90% Color: 83%
Profundidad del medio filtrante y su efecto en la eficiencia de la arena lenta domestica: Filtro en flujo continuo	Freitas et al. (2021)	Arena: 25 cm Arena gruesa: 5cm Grava fina: 5 cm Grava: 7.5 cm	48 L	65 cm	26 cm	Turbidez: 13.2 UNT Color aparente: 61.40 mg/L Pt-Co C.T: 5356 NMP/100 ml pH: 7.05	Turbidez: 3.30 UNT Color aparente: 16.60 mg/L Pt-Co C.T: 48 NMP/100 ml pH: 7.16	Turbidez: 75% Color aparente: 72.96% C.T: 99.10%
Evaluación de filtros de desbaste y arena lenta para el tratamiento de aguas	El-Taweel y Ali (2000)	Arena: 75 cm Grava: 35 cm	Caudal volumétrico: 1×10^{-5} L/min	200 cm	30 cm	Turbidez: 6.50 UNT C.E: 370 μ s/cm STD: 225 ppm pH: 7.50	Turbidez: 0.50 UNT C.E: 370 μ s/cm STD: 225 ppm pH: 7.20	Turbidez: 92.31% C.E: 0% STD: 0%

Investigación	Autor	Composición de los filtros	Capacidad del filtro	Altura de la estructura	Diámetro de la estructura	Parámetros de la calidad iniciales	Resultados	Eficiencia de remoción
Instalación del filtro lento de arena del reactor UASB en efluentes: una técnica prometedora posterior al tratamiento.	Tyagi et al. (2009)	Arena fina: 10 cm Arena gruesa: 22cm Grava fina: 11 cm Grava: 11 cm Bolas de vidrio: 2 cm	100 L	120 cm	10 cm	Turbidez: 56.5 UNT	Turbidez: 2.90 UNT	Turbidez: 91.60%

Nota. Conductividad eléctrica (C.E). Sólidos totales disueltos (STD). Coliformes totales (C.T). Coliformes fecales (C.F). Sólidos totales (S.T).

Velocidad de Filtración

Para la velocidad de filtración se tomaron las medidas de todos los litros vertidos en los filtros. Esto con el propósito de evidenciar el comportamiento de la velocidad de filtración a medida que ingresaba menos volumen de agua en de los filtros. Además, se tomó en cuenta el caudal volumétrico de ingreso hacia los filtros, el cual fue para todas las repeticiones aproximadamente de 0.2 L/min. Se consideró esta medición de agua inicial como guía para prevenir una sobresaturación de agua en el filtro 1, en el que si se le aplicaba un mayor caudal volumétrico provocaba un rebalse del agua cruda.

Según Rivas y García (2016), una velocidad óptima de filtración debe estar entre 1.67 y 3.33 L/min⁻¹ m⁻² y para que pueda ser catalogado como un filtro lento de arena debe estar en rangos de 1.7 hasta 6.7 L/min⁻¹ m⁻². Además, Cordero y Ullauri (2011) menciona que a velocidad más grandes el filtro tiende a obstruirse en un tiempo más corto y se deteriora la calidad del agua filtrada. Por medio de este sistema de caída de agua se comprobó que la presión en que cae el agua fue diferente en todo momento, es decir, el volumen fue disminuyendo simultáneamente a medida que el agua se filtraba.

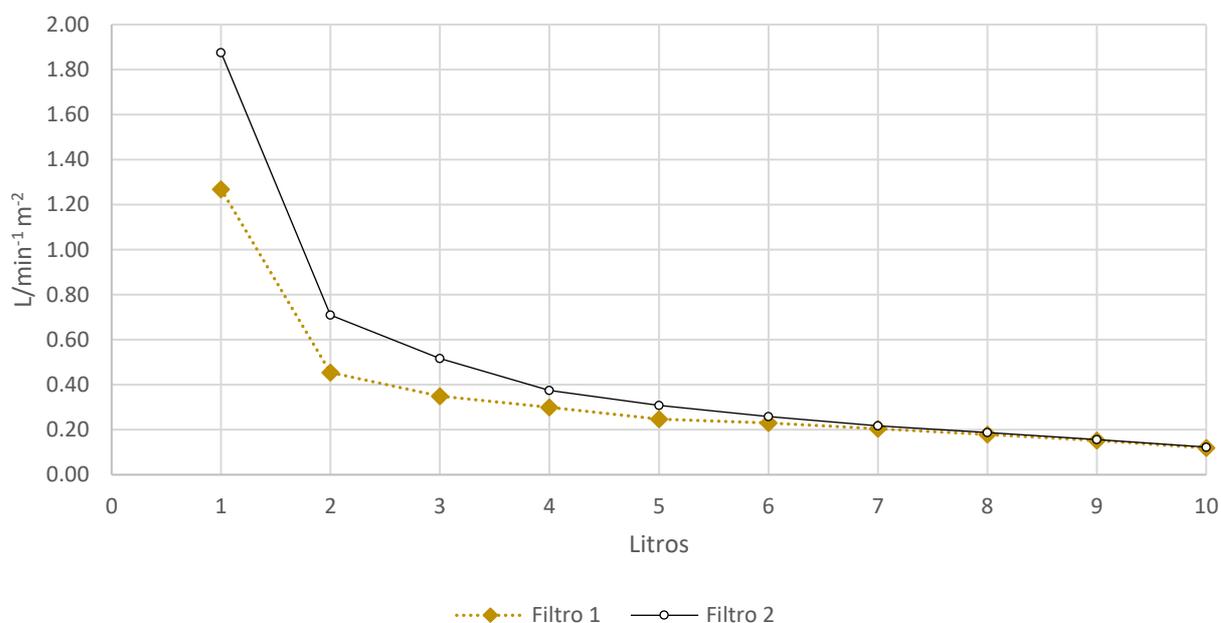
El filtro 1, presentó una disminución de velocidad a medida que pasaban los litros, en el que, su mayor valor fue al filtrar 1 L. Sin embargo, disminuyó considerablemente al filtrar 2 L, teniendo una diferencia de 1 L a otro de 0.8 L/min⁻¹ m⁻² (Figura 2). No obstante, para el resto de los litros filtrados hubo una velocidad de filtración progresiva. Esto se debe al caudal volumétrico de entrada hacia los filtros, en el que fue disminuyendo a medida se iban filtrando los litros (Anexo A). Por otra parte, se determinó que este tratamiento funcionó como un filtro lento de arena, ya que, las velocidades están dentro del rango óptimo de filtración siendo este de 1.3 L/min⁻¹ m⁻². En el filtro 2, igualmente se apreció una diferencia de 1.2 L/min⁻¹ m⁻² entre 1 y 2 L filtrados. Al igual que el filtro 1, este tratamiento también operó en velocidades de filtración óptimas.

La diferencia entre los dos tratamientos con respecto a la velocidad de filtración fue que el filtro 2 presentó mayores valores en comparación con el filtro 1. Esto se debió a la retención de agua

que se dio en el filtro 1, por tamaño de los poros de los sustratos colocados en este tratamiento, el cual, son pequeños. Se comprobó que, por esta razón se forma una capa de agua en la superficie del cuarto sustrato, no permite que el agua fluya con normalidad y se demore un mayor tiempo en filtrar por completo el agua cruda (Anexo V). El filtro 2 por su lado, no presento este problema, puesto que, el agua pasaba con una mayor facilidad por los sustratos sin que provocara una retención como lo hacía el filtro 1. Además, de que, por su capacidad de filtrar el agua sin retener agua dentro de su estructura, se le pueden añadir un mayor caudal volumétrico.

Figura 4

Velocidad de filtración promedio del filtro 1 y 2 a un rango de turbidez de 60 - 70 UNT.



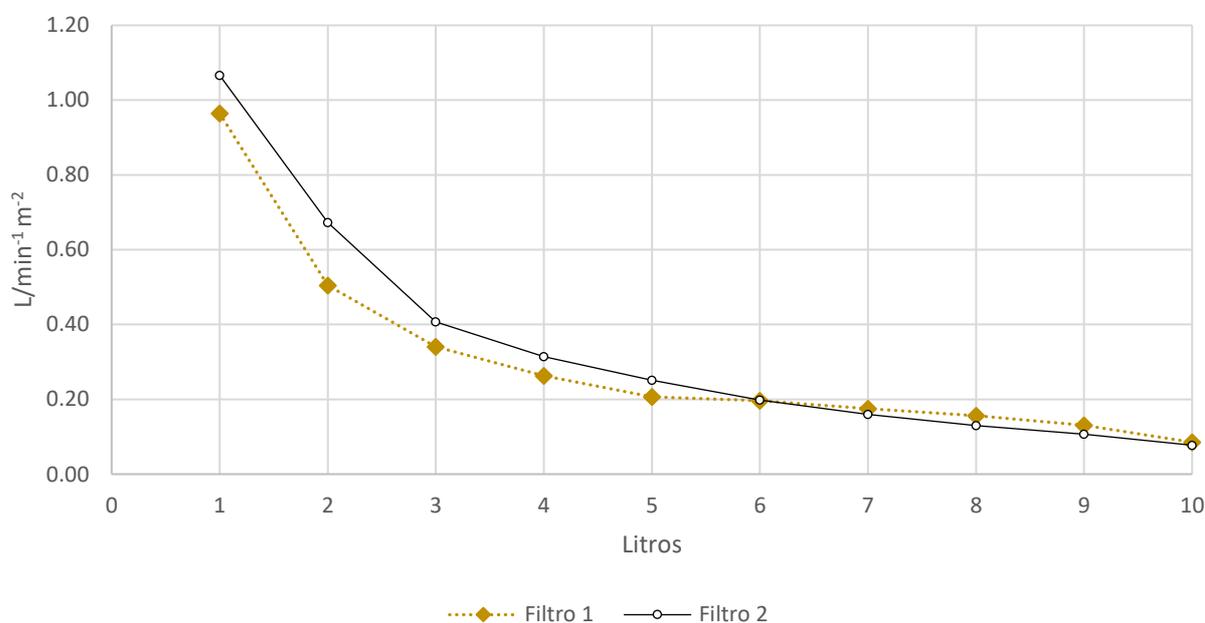
En el filtro 1, la mayor diferencia entre velocidades de filtración se presenta al principio del proceso de filtración, es decir, en el primer y segundo litro filtrado con un valor de $0.46 \text{ L/min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. En el que, posteriormente disminuye para cuando se filtran los otros litros. Estos cambios en las velocidades se debieron primordialmente al caudal volumétrico que ingresaba al filtro, en el que, a medida que este disminuía lo hacía también la velocidad. A través de la velocidad se pudo conocer

que este tratamiento está operando como un filtro lento de arena. El filtro 2 presentó una mayor velocidad de filtración que el filtro 1 en los primeros litros filtrados. En el que, se podría inducir el aumento el caudal volumétrico, lo cual, se disminuiría el tiempo de espera en filtrar el agua (Figura 5).

Una diferencia que se presencié fue entre los rangos de turbidez. En el que la velocidad de filtración de 210 - 230 UNT los valores fueron menores comparados a los valores de un rango de 60 - 70 UNT. Esto se debió principalmente a la cantidad de sólidos que contenían el agua cruda en los dos parámetros. Por lo cual, cuando se presenta una mayor cantidad como es el caso del rango de 210 - 230 UNT el agua demora su proceso de filtración para lograr disminuir las partículas contaminantes haciendo que la velocidad sea menor. Mientras que para turbidez de 60 - 70 UNT, al no presentar la misma cantidad, los filtros tienen un tiempo de filtración menor, haciendo que su velocidad aumente (Anexo A).

Figura 5

Velocidad de filtración promedio del filtro 1 y 2 a un rango de turbidez de 210 - 230 UNT.



Eficiencia de Remoción Bajo Dos Rangos de Turbidez

Esta investigación se trabajó a una temperatura ambiente, donde para turbidez con rango de 60 - 70 UNT, fue en promedio de 23.7 °C y alcanzó temperaturas de 22.8 °C cuando el agua pasaba a través del filtro. Para turbidez con rango de 210 - 230 UNT, fue la misma temperatura inicial y final de 23.5 °C. La temperatura llega a ser un parámetro de medición importante ya que si se evidencia un aumento en grados, indica, una proliferación de microorganismos que influyen negativamente en el sabor, olor y color del agua (W. Aguilar, 2019).

Se tomó seis muestras de agua para análisis de calidad de agua, los cuales fueron: en el primer, tercer, quinto, séptimo y noveno litro filtrado. Además, se tomó una muestra general de todos los litros filtrados por los filtros depositados en las cubetas de plástico en la superficie. Para el análisis de calidad de agua, las muestras fueron tomadas a partir del primer litro filtrado. Esta estimación fue por medio de pruebas anteriores realizadas antes del obtener datos reales. En el que, se evidenció que el tiempo que tarda en filtrarse 1 L fue de 5 a 7 minutos. Mientras que, el tiempo que se tardó en pasar el primer litro filtrado, fue de 0 a 2 minutos. Esta apreciación para comenzar a analizar el agua por los litros de entrada al filtro se basó en la investigación Arana (2016), orientado en la aplicación de carbón activado granular en la filtración de agua clarificada del río Cauca. Indicó que el tiempo de recolección para el análisis de turbidez fue a partir de los 5 minutos hasta llegar hasta los 15 minutos para un total de 6 horas de medición. Por medio de esta investigación, demostró que la primera muestra del agua filtrada en el tiempo 0 fue la que presento mayor turbidez comparado a la inicial, debido al posible lavado de las partículas restantes que no pudieron ser removidas en el transcurso de preparación del medio.

Parámetro de Calidad: Turbidez

Las turbiedades iniciales en un rango de 60 - 70 UNT fueron diferentes en las tres repeticiones (Cuadro 3). Esto se debió a que la turbidez cambiaba diariamente por procesos de sedimentación.

Donde las partículas en movimiento se volvieron partículas sedimentables al pasar un tiempo desde su recolección hasta utilizarla nuevamente para realizar las otras repeticiones, aun siendo mínimas en su alteración. El agua al sedimentar partículas en suspensión remueve o separa de su flujo estos sólidos por efecto de la gravedad. Estas partículas se vuelven más densas que el agua y como resultado el fluido es clarificado y con una suspensión más concentrada (Chulluncuy-Camacho, 2011).

Los valores iniciales para turbidez de 210 - 230 UNT en cada repetición fue diferente. Para la primera repetición se hizo una mezcla con arcilla caolín de 1.9 g para 24 L de agua cruda con una turbidez inicial proveniente del río de 34.05 UNT. Para la repetición dos fue el mismo procedimiento con una turbidez inicial de agua cruda directamente del río de 61.85 UNT, sin embargo, la mezcla de caolín con agua cruda fue con 2.4 g para los 24 L. Para la repetición tres, la turbidez inicial del agua cruda del río fue de 89.6 UNT, en el cual se le añadió 2.9 g de caolín para realizar la mezcla y subir la turbidez a la que se deseaba.

Cuadro 3

Eficiencia de remoción para turbidez en los filtros 1 y 2 en rangos de 60 - 70 UNT y 210 - 230 UNT

Volumen filtrado (L)		Turbidez											
		60-70 UNT						210-230 UNT					
		Filtro 1			Filtro 2			Filtro 1			Filtro 2		
	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	
Inicial	UNT	65.1	70.1	61.2	65.1	68	60.8	210.5	226	224	210.5	222.5	217
1	%	39.0	13.6	23.2	29.9	26.9	25.9	74.1	70.9	77.3	72.1	71.7	70.5
3	%	26.4	34.2	18.5	30.4	31.5	26.9	71.2	75.8	73.3	71.9	71.4	74.2
5	%	27.2	35.9	25	32.5	35.2	27.4	72.9	74.5	75.1	74.9	79.2	72.2
7	%	32	35.2	26.6	36.1	37.4	30.9	72	78.1	74.1	74.3	79.9	73.4
9	%	38.9	36.1	27.1	42.2	41.4	32.2	74.6	88	81.9	75.4	83.2	79.9
General	%	33.1	35.1	28.6	35.7	35.9	29.3	73.9	73	78.9	74.1	73.2	75.7

Nota. Repeticiones del experimento (R.).

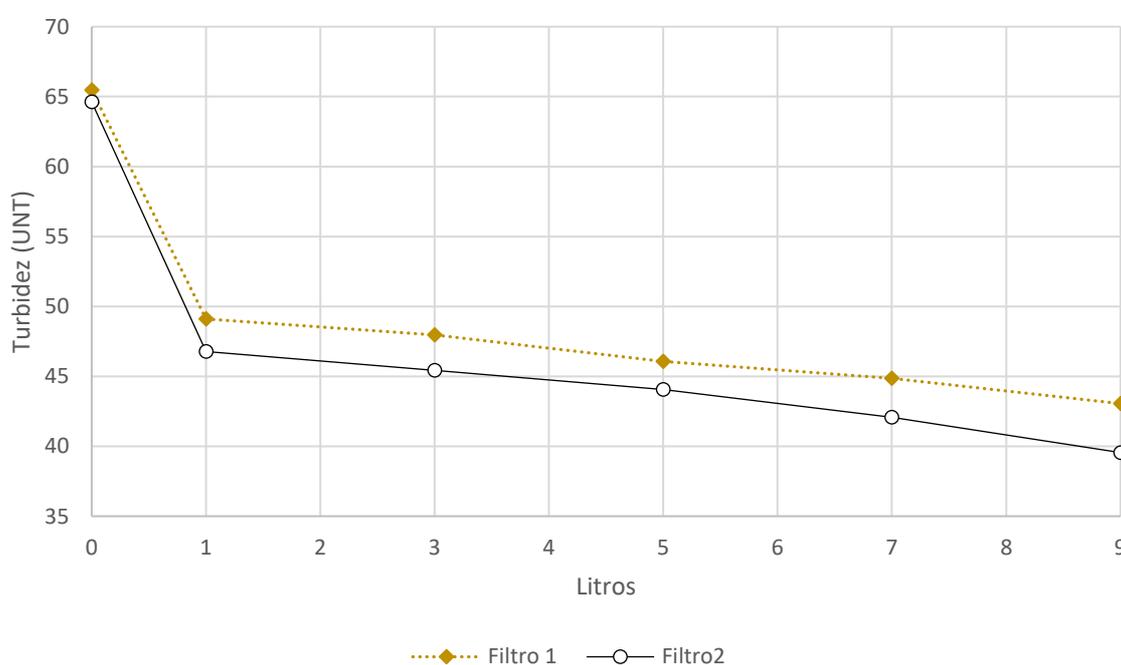
Los filtros mostraron una reducción de turbidez no muy lejos de su valor inicial promediando las tres repeticiones. Sin embargo, se presentan diferencias con respecto a los litros y la remoción de turbidez (Figura 6). En promedio, los filtros mostraron tener una reducción consecutiva en los valores de turbidez, teniendo el menor valor al terminar de filtrar los 9 L. A pesar de que, el filtro 1 presentó

un mayor valor inicial promedio, los valores fueron mayores que el filtro 2, en el que se pudo apreciar que el filtro 2 tiene una mayor reducción de turbidez que el filtro 1. Presentando una mayor turbidez final con una eficiencia de 34.2% y 38.8% para el filtro 1 y 2, respectivamente. Por lo que, el filtro 2 se considera más eficiente en la remoción de contaminantes, por presentar menores valores de turbidez.

Figura 6

Reducción de turbidez con el transcurso de tiempo en horas para el filtro 1 y 2 en un rango de 60 - 70

UNT.



La reducción de turbidez a este rango fue mucho mayor que a un rango de turbidez de 60 - 70 UNT (Figura 7). El filtro 1 mostró un aumento de turbidez a los 3 L filtrados, cuando el primer litro filtrado fue menor. Esto se debe a que el filtro contenía agua anteriormente filtrada de la llave, con una turbidez por debajo de los 5 UNT. Es decir, que el agua de salida del filtro en el primer litro es una combinación entre agua de la llave y el agua cruda con turbidez de 60 - 70 UNT. Por lo que la turbidez fue menor a los siguientes litros. Además, el agua al ser retenida por un tiempo dentro del filtro permite que las partículas del agua se adhieran de una mejor manera en los sustratos. Teniendo como

resultado, una menor carga orgánica en los siguientes litros. Según Villarreal (2018), a medida que el agua sigue avanzando a través del medio filtrante el material en suspensión es removido por cernido y otros procesos como la adherencia, por lo que disminuye la turbidez y el color. Por otro lado, en los espacios vacíos del medio filtrante se llevan a cabo procesos de sedimentación. Sin embargo, la reducción de turbidez fue mayor en el filtro 1, teniendo una eficiencia de 81.7% con un tiempo de finalización cercano a las 6 horas. En el filtro 2 se apreció una buena reducción de turbidez de forma consecutiva. Sin embargo, presenta una menor remoción de turbidez que el filtro 1, teniendo una eficiencia de 79.6%.

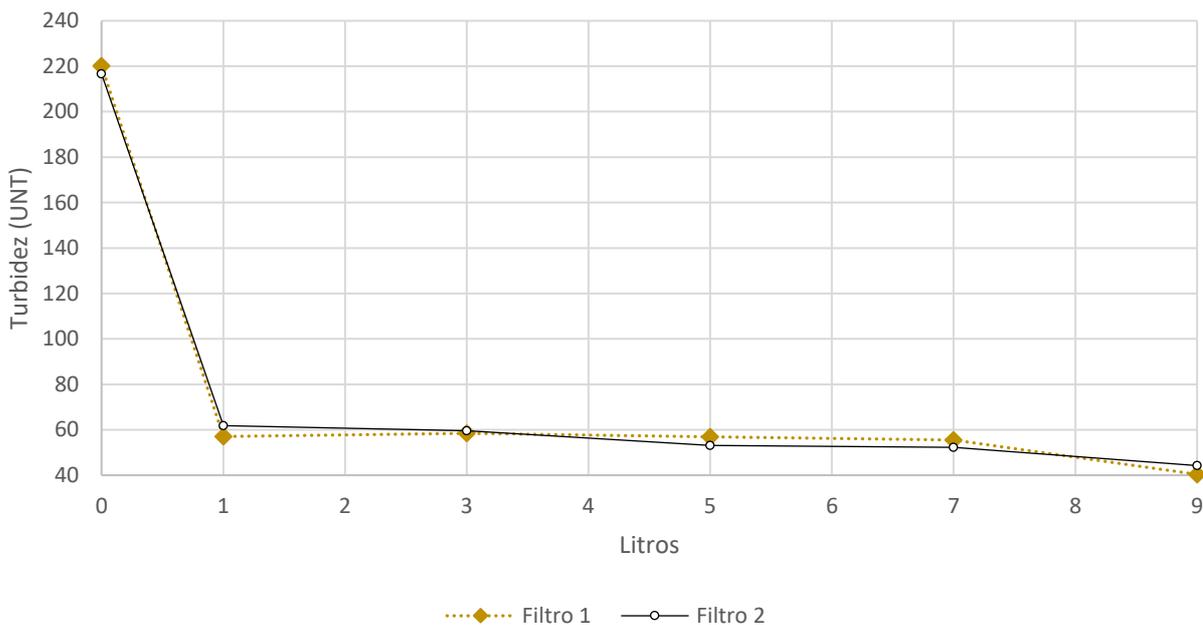
Aunque en el filtro 2 los valores son similares al filtro 1, presentó valores más altos en cuanto a la reducción de turbidez. Esto se debió que, al tener sustratos con un mayor tamaño de diámetro, se crea espacios abiertos, en el cual, el agua los atraviesa con mayor facilidad. A diferencia de tener sustratos con un menor diámetro, donde los poros son más pequeños reteniéndose el agua por un mayor tiempo. La arcilla caolín, según los mineralogistas e investigadores del suelo, tienen un tamaño menor a 2 μm (Mendoza, 2018). Al presentar este tamaño, muchas partículas no lograron ser adheridas en su totalidad en la grava. En el cual, el agua pasaba por estos espacios creados por los minerales. Esto también lo corroboró Sánchez (2017), donde al filtrar agua en un filtro colocando ferrocemento con diámetros entre 2.5 cm y 0.3 cm explicó que las partículas con un tamaño mayor a 80 μm se eliminaron por completo. Sin embargo, para partículas entre 10-80 μm la eficiencia de eliminación estuvo alrededor de un 90% y descendió, siendo difícil la eliminación con partículas menores a 2 μm .

La principal diferencia entre los rangos de turbidez fue que para un rango de 210-230 UNT, hubo una mayor reducción comparado al rango de 60-70 UNT. Lo cual se debe que, al tener menos material presente en el agua, la adherencia es menor. En la investigación de Meléndez (2020), por

medio de un filtro utilizando arena fina, gravilla, carbón activado y grava la eficiencia de remoción en turbidez fue de 56%, siendo su turbidez inicial de 5 UNT.

Figura 7

Reducción de turbidez con el transcurso de tiempo en horas para el filtro 1 y 2 en un rango de 210-230 UNT.



Parámetro de Calidad: Color

El color aparente inicial a una turbidez de 60-70 UNT fue diferente en las tres repeticiones para los dos filtros (Cuadro 4). Mientras que para el rango de turbidez de 210-230 UNT al ser una mezcla entre el agua cruda y la arcilla caolín, aumentó la cantidad de sólidos en la solución y suspendidos, dando un color aparente mayor a 500 mg Platino-Cobalto. No se pudo identificar la cantidad exacta de color, ya que el espectrofotómetro que se utilizó en las pruebas solo puede medir valores entre 0-500 mg Platino-Cobalto.

Cuadro 4

Eficiencia de remoción para color aparente en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT

Volumen filtrado (L)		60-70 UNT						210-230 UNT					
		Filtro 1			Filtro 2			Filtro 1			Filtro 2		
		R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3
Inicial	mg/L Pt-Co	206	188.5	164	206	178	157	>500	>500	>500	>500	>500	>500
1	%	33.5	8.2	20.1	30.1	21.6	18.5	64.4	52.5	66.3	61.4	59.7	59.4
3	%	25.2	27.9	12.8	32.0	28.3	22.3	58.2	57.5	62.1	62.4	60.3	63.6
5	%	28.6	32.6	21.3	33.9	32.2	25.5	58	56.4	65.5	66.4	63.6	59.2
7	%	34.9	33.2	24.4	40.3	33.9	26.1	61.6	64	63.7	66.4	70.2	62.6
9	%	43.5	34.8	26.8	44.2	40.1	28.7	65.6	83.4	73.5	67.6	77.5	71.7
General	%	34.9	32.1	25.6	37.1	31.7	26.1	65.2	60.2	66.6	65.2	61	62.4

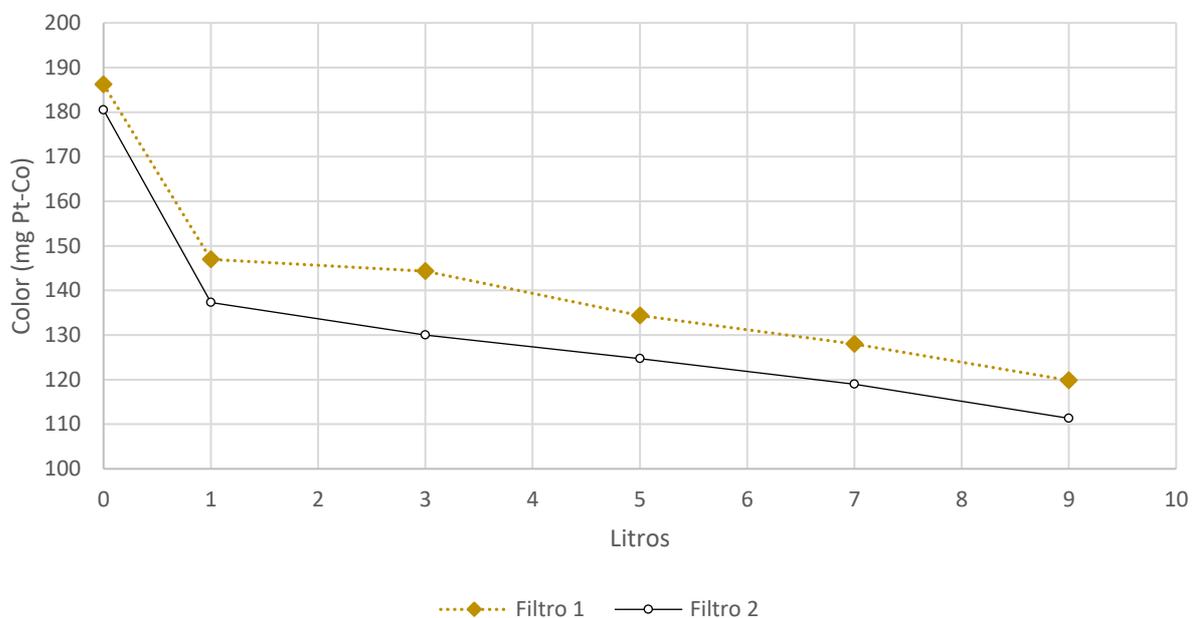
Nota. Repeticiones del experimento (R.).

Los filtros muestran el mismo comportamiento en remoción de turbidez por tener las sustancias presentes en la solución (Figura 8). Esta relación la evidenció Martínez et al. (2020), con su investigación de turbidez como parámetro indicador de tratamiento en una planta potabilizadora municipal. Donde hubo una relación directa entre la remoción de color y turbidez. Sin embargo, el filtro 1 mostró valores más altos que el filtro 2. Mientras que el filtro 2, tuvo resultados menores en valor de color aparente. Lo cual indica, que es más capaz de remover los sólidos suspendidos y disueltos en el agua que el filtro 1 por tener una mayor adherencia en los sustratos. Por estos resultados se comprobó que los resultados de turbidez y color son los mismos en cuanto a tener una mayor remoción para el filtro 1.

Figura 8

Efecto del color aparente con respecto al tiempo de filtración para el filtro 1 y 2 en un rango de 60-70

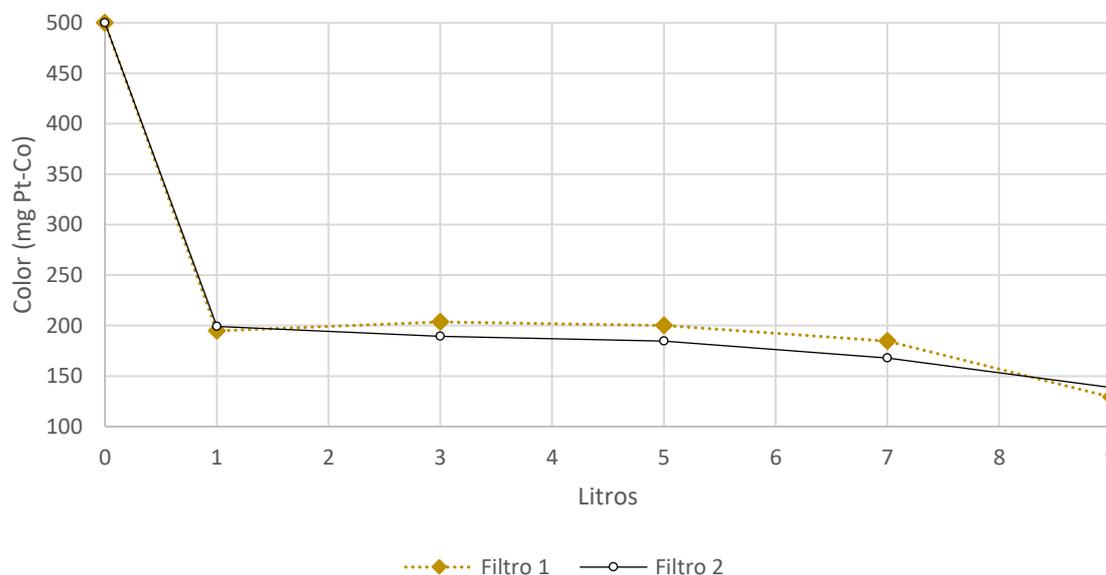
UNT.



El color aparente a una turbidez de 210-230 UNT mostró una similitud en la remoción de turbidez (Figura 9). Sin embargo, el filtro 1 mostró un menor valor en el color aparente, lo cual se debe a la retención del agua dentro del filtro, permitiendo que los sólidos se acentúen en los sustratos, donde tiene una mejor adhesión a los minerales. Los resultados del filtro 2 mostraron un patrón descendente. Sin embargo, a pesar de que la diferencia no es alta, el filtro 1 presentó una menor turbidez en el último litro. Por último, los dos filtros mostraron que en el último litro filtrado es donde se presentó el valor más bajo de turbidez, teniendo una relación con la velocidad en que se filtró el agua.

Figura 9

Efecto del color aparente con respecto al tiempo de filtración para el filtro 1 y 2 en un rango de 210-230 UNT.



Parámetro de Calidad: Potencial de Hidrogeno

Los valores iniciales del agua cruda a un rango de 60-70 UNT en el pH están dentro del rango donde es recomendable para consumo humano (Cuadro 5). Sin embargo, se presentó una disminución en los dos filtros para cada repetición donde ya no está dentro de un rango óptimo para consumo. Esto también se presentó para el rango de 210-230 UNT, donde los valores obtenidos están levemente por debajo de la neutralidad recomendada para consumo humano. Estos mismo resultados también fue analizado por Añazco (2020), donde el agua cruda analizada tuvo un pH de 7. Sin embargo, al finalizar de filtrar el agua por medio de un filtro de arena y arena+carbón activado fue de 5 y 6.1, respectivamente. Se comprueba que, al haber un contacto directo con los sustratos con diferente pH al agua cruda, los resultados finales tuvieron una influencia en el cambio de pH. Además, el pH de los sustratos tiene valores diferentes al agua cruda de entrada, que entre 4 a 8, cambiando indirectamente el pH del agua ya filtrada (Infoagro, 2017).

Además, Hernández et al. (2017) mencionan que, el cambio de pH también puede verse afectado por los grupos químicos de los carbones activados los cuales alteran a los líquidos que son añadidos. Por lo que resulta necesario pulverizar este mineral sin secar. Sin embargo, al presentar un cambio en su composición para transformarse de un mineral vegetal en activado se produce una modificación química del material adsorbente lo cual origina una disminución.

Cuadro 5

pH en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT.

Volumen filtrado (L)	60-70 UNT						210-230 UNT					
	Filtro 1			Filtro 2			Filtro 1			Filtro 2		
	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3
Inicial	7.3	6.7	6.7	7.3	6.7	6.7	7.1	7.3	7.3	7.1	7.3	7.4
1	6.2	5.5	5.9	6.1	5.5	5.9	6	6.0	5.9	5.9	5.9	5.9
3	6.1	5.7	6.3	6.1	5.6	6.2	6.2	6.1	6.1	6.3	6.1	6.2
5	6.3	5.8	6.0	6.3	5.8	6.3	6.1	6.1	6.1	6.6	6.2	5.9
7	6.5	5.9	6.3	6.4	5.7	6.3	6.2	6.2	5.8	5.9	6.3	6.1
9	6.4	5.9	6.2	6.6	6.3	6.5	5.8	5.9	6.1	6.2	6.5	6.1
General	6.4	6.1	6.5	6.5	6.1	6.6	6.4	6.5	6.2	6.7	6.7	6.4

Nota. Repeticiones del experimento (R.).

Parámetro de Calidad: Conductividad Eléctrica

Este parámetro se relaciona con la concentración de sales en el agua, esta disociación genera iones capaces de transportar corriente eléctrica (Solís et al., 2018). En cuanto a los resultados iniciales, no son similares en las tres repeticiones para los filtros en los dos rangos de turbidez (Cuadro 6). Donde en la repetición uno a rango de 60-70 UNT, hubo un aumento en el primer litro filtrado que fue mayor al valor inicial. Esto también sucede a un rango de 210-230 UNT en la repetición dos y tres. Este aumento se debe al caudal volumétrico que entra al filtro. El cual, al ingresar una mayor cantidad de agua a los filtros la cantidad de sólidos retenidos anteriormente sedimentados, se dispersan. Según Espinoza y Trejo (2013), al aumentar el caudal volumétrico en que ingresa el agua al filtro, la capa de sólidos retenidos se dispersan, lo cual, hace que la capa de arena se desordene haciendo que el agua

de salida del filtro contenga sólidos suspendidos. Esto provoca, una pérdida de eficiencia en el agua filtrada.

Cuadro 6

Conductividad eléctrica en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT

Volumen filtrado (L)	Conductividad eléctrica (uS/cm)											
	60-70 UNT						210-230 UNT					
	Filtro 1			Filtro 2			Filtro 1			Filtro 2		
	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3
Inicial	142.8	110.3	110.4	142.8	110.4	112.6	162.9	159.1	163.1	162.9	159.5	157.5
1	192.3	96.1	100.1	172.5	119.8	137.2	209	149.4	198	177.3	140.4	175.4
3	127.8	84.1	88.6	134.8	78.7	95.4	138.5	124.8	133.1	143	124.2	136.6
5	118.9	85.3	88.7	121.3	68.5	87.4	128.5	123.9	124.9	133.6	119.9	148.6
7	114.2	85.3	86.1	117	65.5	101.8	120.4	121.1	133.2	131.9	117.8	123.6
9	113.4	85.3	85.8	116.8	66.9	97.7	128.1	146.1	121	122.6	158.7	119.9
General	135.7	87.9	92.4	137.2	86.2	105.5	143.4	135.6	144.9	137.4	131.4	145.5

Nota. Repeticiones del experimento (R.).

Parámetro de Calidad: Sólidos Totales Disueltos

La cantidad de sólidos totales disueltos al estar relacionada con conductividad eléctrica presentó valores similares en eficiencia (Cuadro 7). El filtro 1 para los dos rangos de turbidez, mostró valores de eficiencia más altos que el filtro 2, por lo que, se comprobó que este filtro remueve una mayor cantidad de contaminantes presentes en el agua. Además, se demostró que los primeros litros en filtrarse son los que pueden presentar una menor eficiencia de remoción. Al contrario, del noveno litro filtrado, que a pesar de que los resultados son mayores, no presentaron una buena eficiencia de remoción. Por otro lado, por medio de las muestras generales se demostró una similitud en los filtros y en los rangos de turbidez.

Cuadro 7

Eficiencia de remoción para sólidos totales disueltos en los filtros 1 y 2 en rangos de 60-70 UNT y 210-230 UNT.

Volumen filtrado (L)	STD (ppm)											
	60-70 UNT						210-230 UNT					
	Filtro 1			Filtro 2			Filtro 1			Filtro 2		
	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3	R. 1	R. 2	R. 3
Inicial	99.5	78.4	79.9	99.5	78.5	79.9	116	115	115	116	114	112
1	137	60.5	67.8	123	85.1	97.6	148	106	140	126	98.4	125
3	91.30	58.3	61.3	95.8	55.9	67.6	98.4	88.5	94.5	102	88.6	96.8
5	84.6	55.9	58.9	86.2	48.6	61.9	91.1	87.3	88.5	94.9	85.1	106
7	81.2	58.1	58	83	46.4	72.4	85.6	86.3	94.4	92.1	83.7	87.8
9	80.6	58.1	57.4	82.9	47.5	69.4	91	103	85.2	86.9	113	84.7
General	96	58.4	60.9	97.3	61.2	74.9	102	94.7	103	104	93.4	103

Nota. Repeticiones del experimento (R.).

El filtro que posee una mayor eficiencia de remoción es el 2 (Cuadro 8). Debido a que su media es mayor que la del filtro 1 para parámetros de calidad como turbidez, color, y conductividad eléctrica. Sin embargo, en el caso de los sólidos totales disueltos, el filtro 1 tuvo una mayor eficiencia, ya que, hubo una mayor retención de partículas presentes en el agua al pasar por este tratamiento.

En la desviación estándar sucede lo mismo, donde el filtro 2 presentó una mayor variación en los parámetros, excepto en sólidos totales disueltos. Aunque, el filtro 2 obtuvo mejores porcentajes que el filtro 1 en los distintos parámetros, el coeficiente de variación tuvo mayores valores. Por lo que, se infiere que hubo factores que pudieron interferir en un correcto control del experimento, como análisis en laboratorio. Los mínimos valores de eficiencia fueron por parte del filtro 1, mientras que, el valor máximo fue en el filtro 2, con excepción de los sólidos totales disueltos. Por último, los errores estándares fueron bajos en cuanto a turbidez y color, siendo los mayores en conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos al estar relacionados.

Cuadro 8

Descripción de los parámetros de calidad de los filtros 1 y 2 en un rango de 60-70 UNT.

	Filtro 1				Filtro 2			
	Turbidez	Color	C.E	STD	Turbidez	Color	C.E	STD
	%	%	µs/cm	ppm	%	%	µs/cm	ppm
Media	32.26	30.9	105.3	71.8	33.9	31.6	109.6	77.8
D.E	3.3	4.8	26.4	21	3.8	5.5	25.8	18.2
Var (n)	7.4	15.4	464.4	294.7	9.5	20.2	442	221.4
C.V	10.3	15.5	25.1	29.3	11.2	17.4	23.5	23.4
Mín	28.6	25.6	87.9	58.4	29.3	26.1	86.2	61.2
Máx	35.1	34.9	135.7	96	35.9	37.1	137.2	97.3
E.E	1.9	2.8	15.2	12.1	2.2	3.2	14.9	10.5

Nota. Desviación estándar (D.E). Variación de la muestra (Var(n)). Coeficiente de variación (C.E). Valor mínimo (Mín). Valor Máximo (Máx).

Error estándar (E.E). Conductividad eléctrica (C.E). Sólidos totales disueltos (STD).

Para este rango de turbidez el filtro que presentó una mayor eficiencia de remoción fue el filtro 1 en todos los parámetros de calidad (Cuadro 9). Sin embargo, en desviación estándar el filtro 1 mostró una mayor variabilidad para turbiedad y color. Mientras que, el filtro 2 tuvo mayor variabilidad para conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos. Esto se debe a que su eficiencia fue cambiando a medida que el agua presentaba más partículas sedimentadas por evaluar el filtro en diferentes días. Por medio del coeficiente de variación, se pudo demostrar que hubo un mejor control en parámetros de turbiedad y color aparente en los dos filtros. Mientras que, en el resto de los parámetros se debería realizar más repeticiones para así tener un mejor manejo en los resultados y reducir la variabilidad. Los valores mínimos en turbiedad y color fue en el filtro 1, y conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en el filtro 2. Los mayores valores se dieron en el filtro 2. Finalmente, en cuanto a error estándar, los resultados de los parámetros para el filtro 1 y 2 fueron bajos.

Cuadro 9

Descripción de los parámetros de calidad de agua de los filtros 1 y 2 en un rango de 210-230 UNT.

	Filtro 1				filtro 2			
	Turbidez %	Color %	C.E μs/cm	STD ppm	Turbidez %	Color %	C.E μs/cm	STD ppm
Media	75.3	64	141.3	99.9	74.3	62.9	138.1	100.1
D.E	3.2	3.4	4.99	4.5	1.2	2.1	7.08	5.9
Var (n)	6.8	7.6	16.62	13.7	1.0	3.1	33.4	22.8
C.V	4.3	5.3	3.53	4.6	1.7	3.4	5.1	5.8
Mín	73.0	60.2	135.6	94.7	73.2	61	131.4	93.4
Máx	78.9	66.6	144.9	103	75.7	65.2	145.5	104
E.E	1.8	1.9	2.9	2.6	0.7	1.2	4.1	3.4

Nota. Desviación estándar (D.E). Variación de la muestra (Var(n)). Coeficiente de variación (C.E). Valor mínimo (Mín). Valor Máximo (Máx).

Error estándar (E.E). Conductividad eléctrica (C.E). Sólidos totales disueltos (STD).

Para pH, resulta favorable que los valores estén cerca de ser neutros (Cuadro 10). Para rango de 60-70 UNT, el filtro 1 presentó una menor media, siendo el filtro 2 el que resulta mejor para filtrar el agua. Sin embargo, este fue el que presentó una mayor desviación estándar, aunque los resultados fueron mínimos. En coeficiente de variación para los dos filtros se presentaron valores que estuvieron en el rango para categorizarlo con un experimento controlado, es decir, menos del 10%. En cuanto a valores mínimos, el filtro 2 presentó este valor. Por último, los errores que presentaron en este experimento fueron mínimos.

Para turbidez de 210-230 UNT, el filtro 2 presentó un mayor valor que el filtro 1, teniendo un valor cerca de un pH neutro. En cuanto a la desviación estándar, los dos filtros presentaron los mismos valores. Para este rango el coeficiente de variación fue menor que a un rango de 60-70 UNT, sin embargo, también se lo consideró como un parámetro que tuvo un buen control al momento de medirlo. Como valor mínimo el filtro 1, fue el que estuvo cerca de un pH 6, mientras que para valores máximos el filtro 2, presentó valores cerca de 7, por lo que, está dentro de los rangos óptimos para consumo. Por último, el error estándar presentados en los filtros fueron mínimos.

Cuadro 10

Descripción de pH de los filtros 1 y 2 en rangos de turbidez de 60-70 UNT y 210-230 UNT.

	60-70 UNT		210-230 UNT	
	Filtro 1	Filtro 2	filtro 1	filtro 2
Media	6.3	6.4	6.4	6.6
D.E	0.2	0.3	0.2	0.2
Var (n)	0.03	0.1	0.02	0.02
C.V	3.4	4.7	2.8	2.5
Mín	6.1	6.1	6.2	6.4
Máx	6.5	6.6	6.5	6.7
E.E	0.1	0.2	0.1	0.1

Nota. Desviación estándar (D.E). Variación de la muestra (Var(n)). Coeficiente de variación (C.E). Valor mínimo (Mín). Valor Máximo (Máx).

Error estándar (E.E).

Se observó que no hubo diferencias significativas entre los filtros. Por lo que, tanto el filtro 1 y 2 en términos estadísticos tuvieron la misma eficiencia de remoción en los dos rangos de turbidez (Cuadro 11). Estos resultados se los puede comparar en la investigación de Burgos y Agudo (2015), donde se filtró agua para tratamiento de aguas recolectadas de pozo para consumo humano, por medio de un diseño de filtro con una altura de 40 cm que contenía zeolita. Los resultados no fueron favorables, en el que, tuvo una eficiencia de remoción de 32.1% en parámetros fisicoquímicos. Por otro lado, Rodríguez et al. (2018), basó su investigación en la construcción de un filtro compuesto de tres capas, siendo la primera de grava, la segunda de piedra chispa y la tercera de arena. En el cual, concluyó obteniendo resultados con una eficiencia de 87.6% en turbidez.

Cuadro 11

Comparación de medias entre el filtro 1 y 2 en rangos de turbidez de 60-70 UNT y 210-230 UNT.

	Unidades	Turbidez 60-70 UNT			Turbidez 210-230 UNT		
		F1	F2	Probabilidad	F1	F2	Probabilidad
Turbiedad	%	32.3	33.7	0.7	75.3	74.3	0.7
Color	%	30.9	31.6	0.9	64	62.9	0.7
pH	-	0.6	0.5	0.8	0.9	0.7	0.4
C.E	µs/cm	105.3	109.6	0.9	141.3	138.1	0.6
STD	ppm	71.8	77.8	0.7	99.9	100.1	0.9

Nota. Conductividad eléctrica (C.E). Sólidos totales disueltos (STD). Filtro 1 (F1). Filtro 2 (F2).

Por último, al terminar todo el proceso de filtración en los filtros se consideró las cantidades de pérdida que hubo al momento de pasar el agua a través de los sustratos. Para una turbiedad de 60-70 UNT, el filtro 1 tuvo una cantidad de pérdida de agua de 0.1% (0.01 L), filtrando un total de 8.9 L en un tiempo de filtración de hasta cuatro horas. Para el filtro 2 el valor fue de 1.6% (0.15 L), teniendo una cantidad final de 8.8 L en un tiempo de filtración que osciló entre 3-3h30 horas. Se comprobó que, el filtro 2 tuvo una mayor cantidad de pérdida de agua que el filtro 1. Esto se debió a que en el filtro 1 hay una retención de agua dentro por medio de los sustratos. Por lo que, el agua retenida anteriormente por lavados del filtro tiende a salir al filtrar el agua cruda, teniendo pérdidas mínimas de agua. Mientras que el filtro 2, al no retener agua en su estructura, esta pasa a ocupar los espacios porosos de los sustratos que no se encuentran saturados de agua completamente.

Para el rango de turbidez de 210-230 UNT, presentó el mismo comportamiento. Por parte del filtro 2 hubo una mayor pérdida de agua filtrada con un porcentaje de 1.5% (0.03 L), filtrando un total de 8.97 L en un tiempo de filtración de cinco horas. Mientras que el filtro 1, tuvo una pérdida de 0.4% (0.13 L), teniendo una cantidad filtrada de 8.87 L cerca del mismo tiempo de filtración que el filtro 2. Para este rango de turbidez el tiempo de filtración fue similar para los dos filtros debido a problemas de obstrucción por parte de la llave de agua para la salida de agua en el recipiente de agua para el filtro 2. En el que, como resultado, demoró el proceso de filtración.

Conclusiones

Mediante revisión literaria se infirió que los factores más importantes en la eficiencia de los filtros de arena es el tamaño de construcción de los filtros, debido a que los filtros con diámetros mayores a 30 cm obtuvieron mejores resultados en cuanto a la reducción de turbiedad.

Los filtros 1 y 2 presentan velocidades de filtración óptimas para filtros lentos de arena. Sin embargo, hay una mayor velocidad de filtración en el filtro 2, debido a no retener agua en su estructura como lo hace el filtro 1.

Los filtros reducen turbidez y color en un 30% para un rango de 60-70 UNT y 70% para el rango de 210-230 UNT. Sin embargo, no cumplen con estándares de calidad para consumo humano. Indicando que es más efectivo usarlo para aguas con una turbidez mayor o igual a este rango o como un mecanismo de pretratamiento del agua.

Recomendaciones

En futuros diseños, aumentar la cantidad de carbón activado, teniendo la altura que los sustratos de arena fina y arena gruesa de 24 cm o más, donde se pueda evaluar que los valores de color aparente tengan una mayor reducción.

Se puede considerar un nuevo diseño con mayor diámetro para evaluar si existe una mayor eficiencia de remoción en los parámetros de calidad.

Para aumentar la eficiencia de remoción de los filtros, se recomienda implementar un pretratamiento, el cual, consiste en incorporar arena fina o gruesa en los recipientes de plástico, donde el agua descanse por un tiempo considerable para luego ser filtrada.

Se debe considerar la implementación de otros materiales filtrantes en la estructura de los filtros, como arenas con diámetros de menor tamaño, materiales caseros como fragmentos de ladrillo, arena de antracita o carbón vegetal.

En la estructura que contiene el agua para filtrar, se recomienda cambiar los grifos de agua para que no presenten problemas de obstrucción y mantengan un volumen constante de salida.

Para futuras investigaciones, considerar realizar experimentaciones para determinar a cuantos litros filtrados se debe realizar limpieza de los sustratos en los filtros. En el que, consiste en remover las partículas contaminantes adheridas que pueden disminuir su eficiencia de remoción en parámetros de calidad.

Referencias

- Acosta, F. y Calvo, H. (2006). *Construcción y uso de un Filtro Lento de Arena, para Promover una Cultura de Consumo de Agua Potable en Estudiantes de Décimo Grado del Instituto ...* [Tesis, Universidad de los Llanos, Villavicencio]. RIS. <https://www.redalyc.org/pdf/843/84340725018.pdf>
- Aguiar, D. y Portela, W. (2009). *Diseño y montaje del laboratorio de filtro lento de arena para agua potable*. Corporación Universitaria Minuto de Dios; Ingeniería Civil. <https://repository.uniminuto.edu/jspui/handle/10656/569>
- Aguilar, O. y Navarro, B. (2018). *Evaluación de la calidad de agua para consumo humano de la comunidad de Llañucancho del distrito de Abancay, provincia de Abancay 2017* [Tesis, Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay]. RIS. <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/130>
- Aguilar, W. (2019). *Evaluación de la calidad de agua para consumo humano obtenida en una microplanta utilizando filtro lento de arena en la Comunidad Nativa de Chunchiwi-Lamas ...* [Maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú]. RIS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/unas/1566>
- Anchundia, P. y Segarra, E. E. (2017). *Análisis del conocimiento de la producción del mineral zeolita en la ciudad de Guayaquil y su aceptación en el mercado internacional* [Tesis, Universidad de Guayaquil, Ecuador]. [repositorio.ug.edu.ec. http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/17216](http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/17216)
- Añazco, E. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de lechos filtrantes de agua para la crianza de trucha (Oncorhynchus mykiss) en la provincia de Chachapoyas - Región Amazonas, 2019* [Tesis]. Universidad Peruana Unión, Perú. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4308>
- Arana, J. (2016). *Evaluación de la aplicación de carbón activado granular en la filtración del agua clarificada del río Cauca* [Tesis, Universidad del Valle, Santiago de Cali]. bibliotecadigital.univalle.edu.co. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/9337>
- Arias, B. y Gonzabay, J. (2022). *Propuesta de Diseño y estudio de un Filtro de Grava para potabilizar el agua subterránea para el consumo en una finca ubicada en la vía Progreso-Playas* [Tesis, Universidad politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador]. [dspace.ups.edu.ec. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22783](https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22783)
- Arrocha, F., Guevara, C., Gonzalez, M., Rivas, F. y Delgado, R. (2019). Evaluación de filtros de carbón activado basado en cáscaras de frutas (piña, plátano, coco, naranja). *Revista De Iniciación Científica*, 5(1), 79–83. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2390>
- Avila, I. y Figueroa, M. (2009). *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* [Tesis, Corporación universitaria Minuto de Dios, Girardot]. repository.unilibre.edu.co. <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10401>

- Avilés, M., Garrido, S., Nájera, C. y La Paz, J. (2011). Remoción de arsénico del agua de consumo humano con filtros de clavos de hierro, fibra comercial, grava y arena. *Revista AIDIS*, 4(1), Artículo 1, 27–35. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1822>
- Ballesteros, M., Arroyo, V. y Mejía, A. (2015). *Inseguridad Económica del Agua en Latinoamérica: de la abundancia a la inseguridad.: VII Foro Mundial del Agua Corea, 2015* (Real, C.). CAF.
- Bertrand, J. (2008). *Determinación del rendimiento de las plantaciones forestales de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras* [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <http://hdl.handle.net/11036/2314>
- Botero, M. (2020). *Generación y selección de alternativas de filtración del agua para el abastecimiento doméstico* [Tesis, Universidad de Antioquia, Colombia]. [bibliotecadigital.udea.edu.co. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18387>](http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18387)
- Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd: for the examination of water and wastewater*,. 23rd edition (23^a ed.). American Public Health Association. <http://dspace.uniten.edu.my/handle/123456789/14241>
- Broncano, L. y Rosario, N. (2017). *Eficiencia del Tropaeolum Tuberosum y la cáscara de Solanum Tuberosum como coagulante para la remoción de turbiedad, color y sólidos disueltos, en el río Lullán ...* [Tesis, Universidas Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú]. RIS. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/unasam/1976>
- Burgos, E. y Agudo, D. (2015). *Análisis de la Eficiencia de Filtros a Base de Zeolita para la Remoción de Contaminantes en el agua Proveniente de dos Pozos de Abastecimiento Público en el Recinto Tres postes, Cantón Alfredo Baquerizo Moreno* [Tesis, ESPOL. FICT, Ecuador]. www.dspace.espol.edu.ec. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/30095>
- Caal, A. (2013). *Diagnóstico de la comunidad de murciélagos en el área de las lagunas de oxidación de Zamorano* [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <http://hdl.handle.net/11036/1783>
- Carcausto, C. (2017). *Purificación de aguas subterráneas por medio de filtros lentos de arena para consumo humano en la comunidad de Thunco-Puno* [Maestría, Universidad Nacional del Altiplano, Perú]. RIS. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/unap/6604>
- Carvajal, A., Rísquez, A., Echezuría, L., Fernández, M., Castro, J. y Aurentis, L. (2019). Recomendaciones sobre el consumo de agua y alimentos en circunstancias especiales. *Comisión De Epidemiología*, 30(1), Artículo 1, 5–9. [https://boletinsvi.com/boletines/boletin%2030\(1\)%20ene-jun%202019.pdf#page=6](https://boletinsvi.com/boletines/boletin%2030(1)%20ene-jun%202019.pdf#page=6)
- Cedeño, J. (2018). *Diseño de filtros Grava-Arena-Carbón para el tratamiento de aguas lluvias almacenadas en cisternas de viviendas unifamiliar en zonas Rurales de Jipijapa* [Tesis, JIPIJAPA-UNESUM, Ecuador]. [repositorio.unesum.edu.ec. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1203>](http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1203)
- Chiclote, Y. E. (2018). *Mejora de la calidad del agua del río Cumbe empleando filtro de carbón activado* [Tesis, Universidad Privada del Norte; PE, Perú]. [repositorio.upn.edu.pe. <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13839>](http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13839)
- Chulluncuy-Camacho, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 0(29), 153–170. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>

- Conant, J. (2005). *Agua para vivir: como proteger el agua comunitaria*. Hesperian Foundation. <https://es.ircwash.org/resources/agua-para-vivir-como-proteger-el-agua-comunitaria>
- Cordero, M. y Ullauri, P. (2011). *Filtros caseros, utilizando ferrocemento, diseño para servicio a 10 familias, constante de 3 unidades de filtros gruesos ascendentes (FGAS), 2 filtros lentos de arena (FLA), sistema para aplicación de cloro y 1 tanque de almacenamiento* [Tesis, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador]. repositorioslatinoamericanos.uchile.cl. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/747>
- El-Taweel, G. y Ali, G. (2000). Evaluation of Roughing and Slow Sand Filters for Water Treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 120(1/2), 21–28. <https://doi.org/10.1023/A:1005252900175>
- Embialle, M., Esayas, A., Adane, S. y Abebe, B. (2006). Removal of Physicochemical and Microbial Impurities of Water Using Modified Homemade Filter. *Ethiopian Journal of Health Sciences*, 16(2), Artículo 2, 112–118. <https://doi.org/10.4314/ejhs.v16i2>
- Espinoza, A. y Trejo, V. (2013). *Caracterización de un filtro de arena para potabilización de agua, mediante la obtención de curvas experimentales basadas en sus parámetros de funcionamiento* [Tesis, Escuela Superior Politecnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador]. www.dspace.espol.edu.ec. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/25259>
- Fernández, A. y Mortier, C. (2005). Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. *Solar Safe Water*, 1, 17–32. https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01_capitulo_01.pdf
- Figueroa, H. (2018). Tipología y clasificación de los hogares hondureños, periodo 2001-2017. *Población y Desarrollo - Argonautas y Caminantes*, 14, 51–70. <https://doi.org/10.5377/pdac.v14i0.6853>
- Freitas, B., Terin, U., Fava, N. y Sabogal-Paz, L. (2021). Filter media depth and its effect on the efficiency of Household Slow Sand Filter in continuous flow. *Journal of Environmental Management*, 288, Artículo 400, 112412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112412>
- Ginebra. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (cuarta edición). World Health Organization. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/7187/1/IAD-2021-T020.pdf>
- Gómez, K. (2010). *Eficiencia del coagulante de la semilla de Moringa oleifera en el tratamiento de agua con baja turbidez* [Tesis, Zamorano, Honduras]. bdigital.zamorano.edu. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/538>
- Gutiérrez, D., Guardado, W., Molina, J., Asensio, H., Vásquez, F., Bonilla, C., Guamán, J. y Bonilla, A. (2019). *Filtros de agua*. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Guzmán, B. L., Nava, G. y Díaz, P. (2015). Calidad del agua para consumo humano y su asociación con la morbimortalidad en Colombia, 2008-2012. *Biomédica*, 35(2), Artículo 2, 90–177. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2511>
- Hernández, M., Otero, A., Falcón, J. y Yperman, Y. (2017). Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO₃. *Revista Cubana De Química*, 29(1), Artículo 1, 26–38. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2224-54212017000100003
- Infoagro. (2017). *Tipos de sustratos de cultivo*. México. <https://mexico.infoagro.com/tipos-de-sustratos-de-cultivo/>

- LaFleur, M. (2014). *Determinantes del acceso a fuentes de agua y saneamiento mejorados y los Objetivos de Desarrollo del Milenio en Honduras* [Tesis, Department of Economic and Social Affairs, United States]. RIS. <http://www.un.org/en/development/desa/policy/capacity/presentations/honduras/determinantes-de-ays-en-honduras.pdf>
- Larrea, C. J. (2015). *Aplicación de un filtro de zeolita para potabilización del agua a nivel domiciliario en el sitio la Palestina, cantón el Guabo, provincia de El Oro* [, Universidad Técnica de Machala, Ecuador]. repositorio.utmachala.edu.ec. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/3120>
- Mamani, L. y Saucedo, E. (2021). *Efectividad del filtro de grava, sulfato de aluminio y carbón activado en la eliminación de detergentes de aguas residuales urbanas de la ciudad de Cajamarca* [Tesis, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Perú]. RIS. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/upagu/2067>
- Martínez, M. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista De La Facultad De Ciencias*, 7(1), 143–155. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.680866>
- Martínez, M., Mendoza, J., Medrano, B., Gómez, L. y Zafra, C. (2020). Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal. *Revistas UIS Ingenierías*, 19(1), Artículo 1, 15–24. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020001>
- Meléndez, W. (2020). *Diseño y evaluación de un filtro lento de arena con carbón activado en la purificación del agua para consumo humano en el distrito de Longar* [Tesis, Universidad César Vallejo; PE; Universidad César Vallejo, Perú]. repositorio.ucv.edu.pe. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/70111>
- Mendoza, C. (2018). *Obtención de geopolímero a base de arcillas y posibles usos* [Tesis]. Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México. <http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/2965>
- Moncada, R. (2017). *Eficiencia del tratamiento filtro lento de arena en la remoción de carga orgánica en efluentes del mercado de Flores, Barranco, 2017* [Tesis, Universidad César Vallejo; Universidad César Vallejo, Perú]. repositorio.ucv.edu.pe. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/8959>
- Monteza, J. (2020). *Proyecto de desarrollo local : promoviendo la salud ambiental con prácticas innovadoras. Centro educativo secundario Carlos Malpica Rivarola La Pauquilla, 2019* [Tesis, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo; PE, Chiclayo]. tesis.usat.edu.pe. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/2450>
- Muhammad, N., Ellis, K., Parr, J. y Smith, M. (1996). Optimization of slow sand filtration. *Reaching the Unreached: Challenges for the 21st Century*(22), Artículo 22, 283–285. https://repository.lboro.ac.uk/articles/optimization_of_slow_sand_filtration/9588743/files/17227820.pdf
- Pérez, J. (2010). *Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la ciudad de Yopal* [Tesis, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga]. RIS. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133761.pdf>

- Reyes, V. (2011). Estudio comparativo y caracterización de caolines comerciales disponibles en la zona de Pachuca, Hidalgo (México). *Academia*(11), 18–20. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/producto.php?producto=2619>
- Rivas, M. y García, W. (2016). *Evaluación de la filtración lenta de arena para la potabilización del agua en el corregimiento de San José de Playón* [Tesis, Universidad de Cartagena, Cartagena]. DataCite. 10.13140/RG.2.2.30392.29440
- Rodríguez, J., Ortiz, D., Rodríguez, E. y Santos, E. (2018). Diseño de un filtro potabilizador ecológico para comunidades rurales, utilizando la Moringa Oleifera. *Revista Lasallista De Investigación*, 15(2), Artículo 2, 118–130. <https://doi.org/10.22507/rli.v15n2a9>
- Rosario, N. y Broncano, L. (2017). *Eficiencia del Tropaeolum Tuberosum y la cáscara de Solanum Tuberosum como coagulante para la remoción de turbiedad, color y sólidos disueltos, en el río Lullán, provincia de Caraz, Ancash-2016*. Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria.
- Rossi, G. (2017). *Diseño de un purificador de agua para uso en la pequeña industria alimentaria de zonas rurales* [Tesis, Universidad Nacional San Agustín, Perú]. RIS. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5965>
- Sánchez, L. (2017). Determinación del factor de adherencia en filtros de grava de flujo ascendente en capas. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 19(2), Artículo 2, 121–130. <https://doi.org/10.25100/iyc.v19i2.5299>
- Smits, S. (2017). *Propuesta para modelos de intervención en agua y saneamiento el área rural dispersa de Honduras*.
- Solís, Y., Zúñiga, L. A. y Mora, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), Artículo 1, 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Toapanta, A. (2018). *Análisis de grava como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora y tinturadora de jeans "Dayantex", ubicada en el Cantón Pelipeo, provincia Tungurahua* [Tesis]. Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/27679>
- Toasa, F. (2012). *Validación de los métodos de ensayo para fenoles, tensoactivos, sólidos suspendidos y total de sólidos disueltos (TDS)* [Tesis, Universidad Central del Ecuador, Quito]. www.dspace.uce.edu.ec. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/894>
- Torres, C. y Villanueva, S. (2014). El filtro de arena lento : Manual para el armado, instalación y monitoreo. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4457>
- Torres, K. y Torres, L. (2019). *Efectos del biofiltro de carbón vegetal de Bambú (Guadua Angustifolia Kunth) en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las aguas residuales domésticas en el distrito de Paccho provincia de Huaura-Lima 2019* [Tesis, Universidad César Vallejo; PE, Perú]. [repositorio.ucv.edu.pe. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/63999](https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/63999)
- Tyagi, V., Khan, A., Kazmi, A., Mehrotra, I. y Chopra, A. (2009). Slow sand filtration of UASB reactor effluent: A promising post treatment technique. *Desalination*, 249(2), Artículo 2, 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.12.049>

- Valdez, L., Meza, M. y Rashta, C. (2018). Tratamiento y reuso de aguas grises mediante un filtro lento de arena. *TECNIA*, 28(1), 81–85. <http://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/190>
- Villanueva, S. (2013). *Implementación de un sistema de filtración lenta de arena en comunidades vulnerables para mejorar la calidad de agua para consumo humano según la normatividad ambiental vigente y la vulnerabilidad de la vivienda* [Tesis, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá]. RIS. <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000942.pdf>
- Villarreal, M. (2018). *Evaluación de materiales locales en la fabricación de filtros para el tratamiento de agua potable: Evaluación de materiales locales en la fabricación de filtros para el tratamiento de agua potable* [Tesis, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santa Clara]. dspace.uclv.edu.cu. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/10173>
- Zamora, J. (2019). *Calidad del agua de la quebrada el tambo usando filtro de antracita, algodón, arena gruesa y caliza triturada* [Tesis, Universidad Privada del Norte; PE; Universidad Privada del Norte, Perú]. [repositorio.upn.edu.pe. https://hdl.handle.net/11537/22280](https://hdl.handle.net/11537/22280)

Anexos

Anexo A

Litros que entran y bajan del filtro, tiempo de filtración, caudal de salida y velocidad de filtración a un rango de turbidez de 60-70 UNT.

Cantidad de litros filtrados (L)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración (L/min ⁻¹ m ⁻²)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración (L/min ⁻¹ m ⁻²)
Filtro 1						Filtro 2				
Repetición 1										
1	0.205	2.220	1	0.450	1.001	0.205	0.720	1	1.389	3.019
2	0.152	7.020	2	0.285	0.633	0.145	6.480	2	0.309	0.671
3	0.124	14.400	3	0.208	0.463	0.120	13.080	3	0.229	0.499
4	0.105	24.240	4	0.165	0.367	0.092	23.280	4	0.172	0.374
5	0.082	36.000	5	0.139	0.309	0.074	36.780	5	0.136	0.296
6	0.071	48.360	6	0.124	0.276	0.052	55.860	6	0.107	0.234
7	0.053	65.520	7	0.107	0.237	0.040	78.060	7	0.090	0.195
8	0.031	91.020	8	0.088	0.195	0.027	109.740	8	0.073	0.158
9	0.021	130.080	9	0.069	0.154	0.017	154.980	9	0.058	0.126
10	0.009	196.320	10	0.051	0.113	0.010	216.600	10	0.046	0.100
Repetición 2										
1	0.205	1.680	1	0.595	1.323	0.210	1.980	1	0.505	1.098
2	0.115	13.140	2	0.152	0.338	0.135	7.560	2	0.265	0.575
3	0.100	24.240	3	0.124	0.275	0.110	15.240	3	0.197	0.428
4	0.075	36.000	4	0.111	0.247	0.075	30.900	4	0.129	0.281

Cantidad de litros filtrados (L)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración ($L/min^{-1} m^{-2}$)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración ($L/min^{-1} m^{-2}$)
5	0.060	48.060	5	0.104	0.231	0.070	47.760	5	0.105	0.228
6	0.055	65.820	6	0.091	0.203	0.060	60.420	6	0.099	0.216
7	0.050	90.420	7	0.077	0.172	0.045	81.180	7	0.086	0.187
8	0.040	118.500	8	0.068	0.150	0.044	102.840	8	0.078	0.169
9	0.027	144.660	9	0.062	0.138	0.032	126.060	9	0.071	0.155
10	0.015	180.600	10	0.055	0.123	0.014	172.680	10	0.058	0.126
Repetición 3										
1	0.210	1.500	1	0.667	1.481	0.220	1.440	1	0.694	1.510
2	0.160	11.340	2	0.176	0.392	0.180	4.920	2	0.407	0.884
3	0.107	21.600	3	0.139	0.309	0.155	10.500	3	0.286	0.621
4	0.090	31.440	4	0.127	0.283	0.125	18.600	4	0.215	0.468
5	0.105	55.260	5	0.090	0.201	0.105	27.240	5	0.184	0.399
6	0.095	63.000	6	0.095	0.212	0.080	40.080	6	0.150	0.325
7	0.070	76.320	7	0.092	0.204	0.065	56.820	7	0.123	0.268
8	0.055	92.520	8	0.086	0.192	0.055	74.100	8	0.108	0.235
9	0.020	122.940	9	0.073	0.163	0.027	104.820	9	0.086	0.187
10	0.010	184.560	10	0.054	0.120	0.012	152.940	10	0.065	0.142

Anexo B

Litros que entran y bajan del filtro, tiempo de filtración, caudal de salida y velocidad de filtración a un rango de turbidez de 210-230 UNT.

Cantidad de litros filtrados (L)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración (L/min ⁻¹ m ⁻²)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración (L/min ⁻¹ m ⁻²)
Filtro 1										
					Repetición 1					
1	0.200	2.280	1	0.439	0.975	0.203	1.740	1	0.575	1.249
2	0.126	7.680	2	0.260	0.579	0.125	6.840	2	0.292	0.636
3	0.087	17.100	3	0.175	0.390	0.085	16.320	3	0.184	0.400
4	0.080	30.900	4	0.129	0.288	0.060	31.320	4	0.128	0.278
5	0.066	69.600	5	0.072	0.160	0.046	48.840	5	0.102	0.223
6	0.051	84.480	6	0.071	0.158	0.027	94.500	6	0.063	0.138
7	0.040	109.020	7	0.064	0.143	0.016	124.500	7	0.056	0.122
8	0.045	136.020	8	0.059	0.131	0.029	178.080	8	0.045	0.098
9	0.028	153.000	9	0.059	0.131	0.018	233.100	9	0.039	0.084
10	0.009	220.980	10	0.045	0.101	0.016	288.600	10	0.035	0.075
					Repetición 2					
1	0.205	2.100	1	0.476	1.058	0.200	2.040	1	0.490	1.066
2	0.110	9.360	2	0.214	0.475	0.167	5.820	2	0.344	0.747
3	0.077	20.340	3	0.147	0.328	0.125	14.160	3	0.212	0.461
4	0.055	40.680	4	0.098	0.219	0.100	23.400	4	0.171	0.372
5	0.100	51.000	5	0.098	0.218	0.080	34.800	5	0.144	0.312
6	0.070	61.860	6	0.097	0.216	0.060	52.260	6	0.115	0.250
7	0.050	80.520	7	0.087	0.193	0.041	76.500	7	0.092	0.199

Cantidad de litros filtrados (L)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada(L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración (L/min ⁻¹ m ⁻²)	Caudal volumétrico que entra al filtro (L/min)	Tiempo de filtración (min)	Cantidad de agua purificada (L)	Caudal de salida (L/min)	Velocidad de filtración (L/min ⁻¹ m ⁻²)
8	0.032	103.320	8	0.077	0.172	0.025	114.480	8	0.070	0.152
9	0.010	159.660	9	0.056	0.125	0.016	158.640	9	0.057	0.123
10	0.007	334.320	10	0.030	0.066	0.010	336.600	10	0.030	0.065
Repetición 3										
1	0.200	2.580	1	0.388	0.861	0.210	2.460	1	0.407	0.884
2	0.110	9.660	2	0.207	0.460	0.120	6.840	2	0.292	0.636
3	0.106	21.900	3	0.137	0.304	0.082	18.000	3	0.167	0.362
4	0.090	31.320	4	0.128	0.284	0.065	29.760	4	0.134	0.292
5	0.065	45.840	5	0.109	0.242	0.055	49.740	5	0.101	0.219
6	0.051	61.920	6	0.097	0.215	0.043	62.760	6	0.096	0.208
7	0.050	82.320	7	0.085	0.189	0.024	97.020	7	0.072	0.157
8	0.030	106.980	8	0.075	0.166	0.035	123.780	8	0.065	0.141
9	0.018	146.160	9	0.062	0.137	0.018	172.020	9	0.052	0.114
10	0.006	249.660	10	0.040	0.089	0.008	235.740	10	0.042	0.092

Anexo C

Lijar tubos cuadrados de metal



Se comenzó a construir la base en donde se colocó el filtro, donde el primer paso fue cortar los tubos cuadrados de metal y luego ligarlos. Este paso se lo realizó con el fin de soldar todas las partes y luego pintarlas.

Anexo D

Tamizado de arena fina, arena gruesa y grava.



El tamizado se lo hizo por medio de redes metálicas, donde se separó mediante el tamaño de partícula de los sustratos. Se inicio separando la grava, en el cual caían dentro de una olla de metal la arena gruesa y la arena fina. Posteriormente, se separó la arena gruesa de la fina con una red más pequeña. Estos materiales fueron lavados después de este proceso.

Anexo E

Pintado de la estructura donde se colocaron los recipientes de plástico.



Se pintó los tubos cuadrados de metal que sirvieron de base para los recipientes de plástico y el filtro con una pistola de pintura marca Truper®.

Anexo F

Colocación de los sustratos dentro de los filtros.



Los materiales fueron ubicados de abajo hacia arriba, en el que una vez llenado una capa se le tapó con la malla de tela en las roscas para después seguir con la siguiente capa. Al momento de terminar de cubrir una capa se media con una regla cuantos centímetros había ocupado de ese sustrato. Esto con el fin de medir la altura que ocupa un sustrato en una capa del filtro.

Anexo G

Instalación de los filtros con su respectiva estructura dentro del laboratorio del departamento de Ambiente y Desarrollo.



Los filtros se los instaló en el laboratorio con el propósito de analizar las muestras una vez el agua fuese filtrada. Así, no se necesita movilización de las muestras de un lugar a otro, ya que los materiales necesarios para analizar se encontraban en este sitio.

Anexo H

Recolección del agua en el río del Yeguaré.



En total, se hicieron tres recolecciones de agua. El agua la colocó en botes de plástico con una capacidad de aproximadamente 20 L, donde fueron lavados antes de ser usados. La primera recolección se la hizo el 29 de abril, donde se presentó lluvia con una precipitación de 2.7 mm. La segunda recolección se la realizó el día 2 de mayo, en horas de la tarde, donde se presentó lluvia un día antes con una precipitación de 2.4 mm. La última recolección se la hizo el día 11 de mayo donde el día anterior tuvo una precipitación de 3.1 mm.

Anexo I

Supervisión del filtro 1 en caso de rebalse.



Para el paso de agua de 0.200 L, se tuvo que hacer pruebas antes y encontrar el volumen de agua donde no ocurra rebalses de agua fuera del filtro.

Anexo J

Paso del agua cruda a través de los filtros.



El proceso de filtración se lo realizó por medio de cronometro, donde primero se abrió la llave del filtro 1 y luego del filtro 2. Esto fue por el tiempo en que se tardaba en encontrar el volumen adecuado de 0.200 L y no se pudo abrir las dos llaves al mismo tiempo.

Anexo K

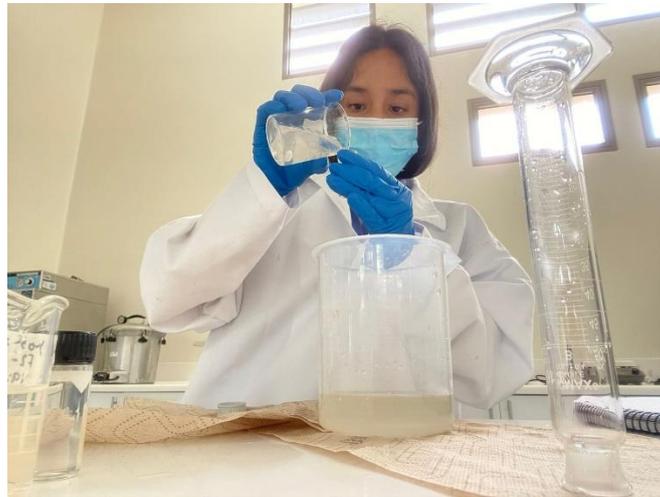
Utilización del multiparámetro en las muestras de agua



Para la toma de muestras se colocaba el agua en un “beaker” de cristal, para luego colocarle una capsula magnética en un agitador magnético.

Anexo L

Llenado de celdas.



El llenado de las celdas se lo hizo después de descansar las muestras en el “beaker”. Se llenó la celda tres veces, y la cuarta vez fue la que se llevó en el turbidímetro para analizar la turbidez.

Anexo M

Análisis de turbidez



La muestra fue analizada a través del turbidímetro, en el que se obtuvieron dos resultados para luego promediarlos.

Anexo N

Primera recolección proveniente del río del Yeguaré.



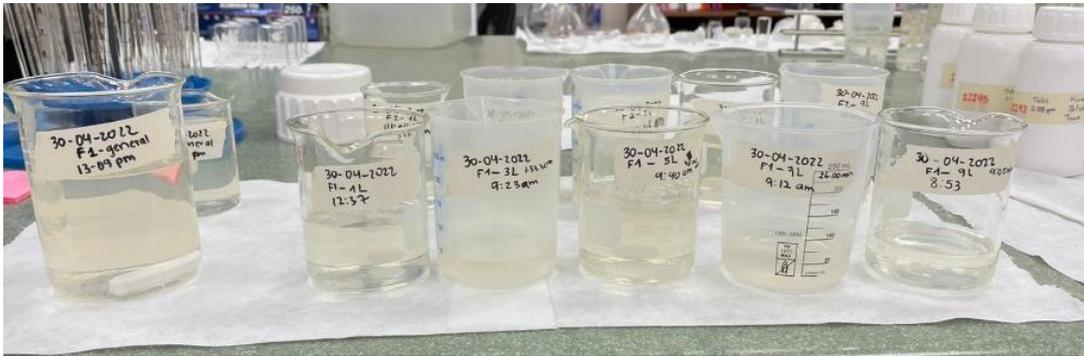
La primera recolección se lo hizo en horas de la tarde, el cual, permitió seleccionar el rango en que se trabajaría en esta investigación.

Anexo O*Segunda recolección proveniente del río del Yeguaré*

La segunda recolección se la realizó con el objetivo de analizar la turbidez del río un día después de una torrencial lluvia.

Anexo P

Muestras de la primera repetición a un rango de turbidez de 60-70 UNT.



Las muestras fueron separadas por beakers, donde se les colocó la fecha en que se filtró el agua, los litros a analizar y la fecha en que se tomó la muestra.

Anexo Q

Muestras de la segunda repetición a un rango de turbidez de 60-70 UNT.



Las muestras fueron analizadas donde se las identifico por medio de la fecha, los litros y la hora.

Anexo R

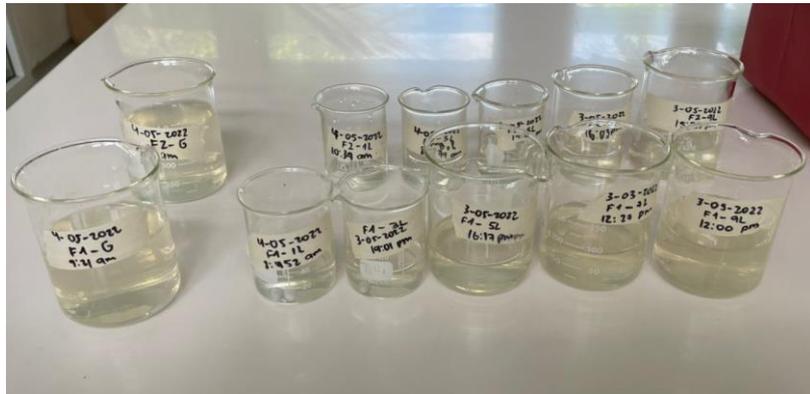
Muestras de la tercera repetición a un rango de turbidez de 60-70 UNT.



Las muestras fueron analizadas donde se identificó la fecha, los litros y la hora.

Anexo S

Muestras de la primera repetición a un rango de turbidez de 210-230 UNT.



Las muestras fueron diferenciadas por los litros, además, de la fecha y la hora.

Anexo U

Muestras de la tercera repetición a un rango de turbidez de 210-230 UNT.



Las muestras fueron diferenciadas por litros, la fecha y hora.

Anexo V*Representación de rebalse en el filtro 1*

Retención del agua dentro del filtro 1, al tener un volumen mayor a 0.200 L/min.

Anexo W*Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para rango de turbidez de 60-70 UNT*

Prueba de normalidad Shapiro-Wilks		
Parametro de calidad	Unidad	Probabilidad
Turbidez	%	0.05
Color	%	0.31
pH	-	0.11
C.E	uS/cm	0.11
STD	ppm	0.11

Nota: Conductividad eléctrica (C.E). Sólidos totales disueltos (STD).

Los valores de probabilidad al ser mayores al 5% se los considera como una distribución normal.

Anexo X*Prueba de normalidad Shapiro-Wilks para un rango de turbidez de 210-230 UNT*

Prueba de normalidad Shapiro-Wilks		
Parametro de calidad	Unidad	Probabilidad
Turbidez	%	0.53
Color	%	0.52
pH	-	0.06
C.E	uS/cm	0.64
STD	ppm	0.03

Nota: Conductividad eléctrica (C.E). Sólidos totales disueltos (STD).

Los valores de probabilidad al ser mayores al 5% se los considera como una distribución normal.