

Diseño de filtro para el tratamiento de agua de lluvia para uso doméstico.

“Desing of a filter for rainwater treatment for domestic use”

Salazar-Barrientos, J.I.¹ Licea-Barroso, F.² González-Hermosillo, M.I.¹, Sánchez –Duran A.³ Nieto-Hernández A.K.⁴ Ordaz Navarrete L.X.⁴ Morales-Padilla, Y.M.⁵, Álvarez-Guzmán, G.⁵

¹Licenciatura en Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N 36050
jsalazarbarrientos@ugto.mx, mi.gonzalezhermosillo@ugto.mx

²Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N 36050
f.liceabarroso@ugto.mx

³Licenciatura en Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Av. Benito Juárez 77, Zona Centro, 36000
a.sanchezduran@ugto.mx

⁴Bachillerato General, Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Alameda S/N; Colonia Centro; 36000.
ak.nietoherandez@ugto.mx, lx.ordaznavarrete@ugto.mx

⁵Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Alameda S/N; Colonia Centro; 36000
mpadilla@ugto.mx, g.alvarez@ugto.mx

Resumen

El agua de lluvia es una alternativa amigable para combatir la escasez de agua global, para mejorar su calidad tras un proceso de captación se realiza un proceso de filtración. En este proyecto, se presenta el diseño de un filtro para el tratamiento de agua de lluvia que tenga la calidad suficiente para ser utilizada en labores domésticas, utilizando materiales como arena, grava, carbón activado y zeolita debido a fácil adquisición y su amplio uso en potabilización del agua. A su vez se llevó a cabo un análisis fisicoquímico del agua antes y después de pasar por el filtro considerando factores como: pH, dureza, concentración de cloruros y sólidos disueltos totales (SDT), encontrando que el filtro diseñado cumple con los estándares de calidad requeridos para el uso de agua no potable y presenta una posibilidad para almacenaje y futuro reúso en la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato.

Palabras clave: filtración, agua de lluvia, material- adsorbente, diseño de filtro.

Introducción

La escasez de agua es una problemática global alarmante, es por eso por lo que constantemente se buscan nuevas alternativas para el uso sustentable y responsable de este recurso. Se estima que para el año 2030 el planeta se encontrara con un déficit de agua del 40% según la Asociación Internacional del Agua (IWA) [1]. El rehusó de agua residual es una alternativa, sin embargo el coste es su reprocesamiento se incrementa si se presentan contaminantes como metales pesados, grasas, tintes, propiciando problemáticas en su proceso de purificación, además de lo anterior, la crisis climática es otro factor a considerar y en nuestro país existen zonas donde el estrés hídrico derivado por la sobre explotación de los mantos acuíferos, la calidad del agua subterránea y la escasez de lluvia pone en riesgo a ciudades de poder tener acceso a este recurso, un ejemplo reciente es lo ocurrido en Nuevo León [2]. En el Bajío mexicano, la ciudad de Guanajuato debido a los factores antes mencionados se está propiciando que entre en crisis por la falta de este vital líquido. Ante este panorama, el agua de lluvia se presenta como una alternativa amigable con el medio ambiente ya que no se explotaría un acuífero u otras fuentes de extracción, reduciría los escurrimientos a drenajes y calles durante aguaceros y con ello, disminuiría la presión sobre la infraestructura hidráulica y minimizaría los riesgos de encharcamientos o inundaciones, entre otros beneficios [3]. Es importante mencionar que la calidad del agua de lluvia es buena, pero podemos mejorar aún más su calidad si en este proceso de captación realizamos un tratamiento de filtración.

La filtración es un proceso utilizado principalmente para la eliminación de material particulado, microorganismos, y precipitados iónicos u orgánicos, las partículas removidas se obtiene a través del uso de

diversos materiales absorbentes. Las características esenciales que debe de tener un material adsorbente para agua son: una alta capacidad de adsorción, rápida velocidad de adsorción y fácil regeneración [4], lo que permite que el proceso de adsorción se lleve a cabo de manera eficiente dentro del filtro que se adhieren por enlaces de tipo no covalentes. Alguno de los materiales más comunes para elaborar sistemas de filtración de agua, tenemos: carbón activado, arenas, grava, zeolita, alúmina activada, oxido de magnesio, calcitas, etc. Los cuales tienen la capacidad de retener material particulado (iones, metales, microorganismos, moléculas) y que además tiene una tasa de regeneración y uso cíclico alta, así como su fácil adquisición, haciendo más eficientes estos procesos. En este proyecto de investigación, se llevó a cabo un diseño y adaptación de un sistema filtrante a un sistema de capacitación de agua de lluvia (SCALL), colocado previamente en las instalaciones de la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, el objetivo que se pretende alcanzar es el de mejorar la calidad del agua captada, sea, económicamente accesible, y que cumpla con los límites establecidos por las normas oficiales en materia de agua para su uso doméstico [5].

Materiales y Métodos

Para llevar a cabo este proyecto, nos centramos en las siguientes actividades: Diseño y manufactura del sistema de filtros y pruebas fisicoquímicas para evaluar los parámetros de la muestra problema antes y después del proceso filtrado.

Diseño y Manufactura del Filtro

El filtro está manufacturado con tubería de PVC sanitario de 4", reductores de 2" y tapas ciegas de 4". El diseño consta de 2 filtros de sedimentación, optando por este debido a que los flujos que se manejan en el proceso de captación son variables estando en función por el nivel de precipitación y por las presiones que se generan, así como el aprovechamiento de la gravedad para no echar mano de equipo de bombeo. Los filtros están conectados a través de un sistema de mangueras para recircular el agua que pasa por cada uno. Cada filtro está equipado con materiales de distinto tamaño de poro. El primer filtro es de grava y arena, posee una capa de grava de 20 cm de espesor con un tamaño promedio que ronda 0.8-1.2 mm, una capa de arena gruesa (4.75 mm) de 5cm de espesor y una capa de arena fina (9.5 mm) de 5cm. El segundo filtro es una combinación de zeolita (arcilla) con un tamaño promedio entre 3 a 4.5 mm dejando una capa de 20 cm y de carbón activado con un tamaño de 3mm con una capa de 10cm. Los materiales fueron separados por una malla y una tapa ciega con agujeros que permiten el paso del afluente a las divisiones de este, para su reutilización, practicidad al desarmarlo y poder limpiar y/o cambiar los materiales adsorbentes. Estos materiales se escogieron por su amplio uso en los procesos de potabilización de agua, por su fácil adquisición y por tener la capacidad de poder retener iones como Ca^{2+} , Na^+ , K^+ ; Nitratos, NH_4 , moléculas orgánicas y cloro entre otros que tienden a ser elementos nocivos en el agua y base para el crecimiento de microorganismos.

Para poder ver el efecto sobre el agua a tratar, se dispuso a evaluar previamente los parámetros fisicoquímicos de muestra de agua de lluvia colectada en el mes de mayo y a principios de junio, para tener un panorama de la calidad del agua, y que posteriormente se evaluaron al pasar la muestra por el sistema de filtrado, lo cual se describe a continuación.

Pruebas Fisicoquímicas

Pruebas rápidas de Iones Presentes.

Esta prueba consiste en evaluar que iones están presentes en una muestra, son pruebas rápidas ya que por medio de una respuesta visual nos indica su presencia o no, para el caso del agua, los iones a evaluar son Fe^{3+} , Cl^- , Ca^{+2} , SO_4 , los cuales son atribuidos a los sistemas de almacenamiento, conducción, y la composición de la atmosfera, estas pruebas generan precipitados y cambios de color, para nuestro caso dio negativo para Fe^{3+} y SO_4 , dando positivos para Cl^- y Ca^{+2} , ante esto se optó por otras técnicas para determinar en qué cantidad están presentes y poderlas contrastar con la NOM 127-SSA1-2021 [5], que mide los parámetros de agua para consumo humano.

Determinación de Dureza Total

La dureza del agua se define como la concentración total de iones de Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}) presentes en ella. Esta metodología, lograda por titulación [6] se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones de calcio y magnesio. Se colocaron muestras de agua sin filtrar y filtrada de 50 ml en matraces Erlenmeyer de 250 ml, posteriormente se añadieron 2 ml de una solución amortiguadora para alcanzar un pH de 10, se agregó 1 ml de indicador negro de eriocromo T teniendo así una muestra color vino rojizo y agitando constantemente, finalmente se llevó a cabo la titulación con una disolución de EDTA 0.01 M hasta cambiar el vire a un color azul. Lo anterior se realizó por triplicado para validez estadística.

Cálculo de Dureza Total

Para el cálculo de la Dureza Total se utilizó la siguiente ecuación [6]:

$$[\text{CaCO}_3] = \frac{(V_{\text{EDTA}})(\text{EDTA})}{V_{\text{muestra}}} PM_{\text{CaCO}_3} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$[\text{CaCO}_3]$ = concentración de carbonato de calcio en ppm (mg/L)

$[\text{EDTA}]$ = Molaridad del EDTA utilizado para la titulación

V_{EDTA} = Volumen consumido de EDTA en mL

V_{muestra} = Volumen de muestra en mL

PM_{CaCO_3} = Peso molecular de CaCO_3

Determinación de cloruros

Esta metodología por titulación; utiliza el ion cromato como indicador para la determinación argentométrica de cloruros con ion el ion plata, conocida también como método de Mohr [7]. Se utilizaron 100 ml de muestras filtradas y sin filtrar, posteriormente se ajustó el pH entre 7 y 10 cuando fue necesario con H_2SO_4 0.1 N y/o NaOH 0.1 N usando fenolftaleína, después se agregó 1 ml de solución indicadora de K_2CrO_4 para su valoración con una solución de nitrato de plata hasta buscar un cambio en el vire del amarillo característico del cromato a un rojo ladrillo. Lo anterior se realizó por triplicado para validez estadística.

Cálculo de la concentración de cloruros

Para el cálculo de la concentración de cloruros (mg L^{-1}) presentes en la muestra se utilizó la siguiente ecuación: [7]

$$N_{\text{AgNO}_3} V_{\text{AgNO}_3} = N_{\text{Cl}} V_m \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

N_{AgNO_3} = normalidad del nitrato de plata (eq L^{-1})

V_{AgNO_3} = volumen del nitrato de plata (L)

N_{Cl} = normalidad de cloruros (eq L^{-1})

V_m = Volumen de la muestra (L)

Determinación de sólidos disueltos totales

Los sólidos disueltos totales (SDT) es el porcentaje de componentes tales como sales o minerales disueltos en agua utilizado para determinar la calidad del agua potable. El cálculo de los SDT se realizó con un medidor de pH/conductividad/TDS modelo HI98129 (HANNA instruments ®)

Discusión y Resultados

Recolección de muestra.

La toma de muestra se realizó en el mes de junio del presente año, de un sistema de captación de agua de lluvia ubicado en la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, México. Estas muestras se utilizaron para las pruebas fisicoquímicas antes y después de pasar por el filtro, se dividieron en 3 contenedores. El contenedor 1 siendo entonces el agua obtenida de un contenedor que había sido lavado con pastillas de hipoclorito de sodio y ahí fue recolectada el agua. El contenedor 2 proveniente del agua captada directamente

del sistema de captación de agua de lluvia, mientras que el contenedor 3 es del mismo origen que el contenedor 2 con la única diferencia que esta misma paso por una membrana únicamente con la finalidad de eliminar objetos macroscópicos como plantas o ramas que se quedarán estancadas en el contenedor sin afectar las características del agua. Debido a la temporada la temperatura ambiente en el laboratorio y, por lo tanto, del agua recolectada oscilaba entre en los 26-30 °C como se mostrará posteriormente.



Figura 1. Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, México (Google Earth, 2019).

Realización del filtro

Figura 2. Diseño de Filtro (González Hermosillo 2023).

Como se puede apreciar en la Figura 2, tanto el diseño como la selección de los materiales adsorbentes fue realizada con la finalidad de generar una filtración progresiva y selectiva conforme tanto el tamaño del poro disminuyera y se implementarán mejores materiales adsorbentes. Además del proceso de filtración, que, si bien por sí solo involucra que el agua impura pase por cavidades de manera lenta, nos apoyamos en procesos

como la decantación y la cloración ya que los estos procesos por si solos no son suficientes para purificar el agua. Mientras más tiempo el agua este sedimentada, mejor el proceso de sedimentación, parte de estos principios se siguieron en la decisión de la longitud de cada material en los diversos filtros mostrados en la figura 1. Respecto a los materiales la calidad del agua de lluvia depende la calidad de la atmosfera por lo que la elección de los materiales para el filtro tenía que estar dirigida hacia esa premisa. La grava es el primer material en entrar en contacto con el agua a tratar para eliminar la presencia de sólidos en la muestra de agua y así pasar al compartimiento de arena gruesa, la arena a lo largo de la historia ha sido un gran medio filtrante, además de su fácil accesibilidad y precio. En este momento nos ubicamos ya en el segundo filtro combinando tanto la arena gruesa como la arena fina como medios filtrantes. la arena fina, con las mismas ventajas mencionada anteriormente, se busca que elimine la turbidez del agua principalmente. Es así como nos encontramos en el último filtro que tiene 2 materiales absorbentes: carbón activado y zeolita, el carbón activado es ampliamente utilizado en la purificación del agua, por su porosidad y capacidad de adsorber por medio de interacciones químicas débiles moléculas orgánicas como el benceno [8, 9], compuesto clorados o florados y iones metálicos como hierro o manganeso [8, 9] a su vez elimina la turbidez y el mal olor en caso de que el agua posea dichas características. Las zeolitas, generalmente a base de aluminosilicatos, tienen una gran ventaja además de las ya mencionadas idénticas al carbón activado, la forma cristalina de las zeolitas en forma de "jaula" tienen la capacidad de encapsular en ellas iones metálicos o moléculas de agua para formar parte de la misma zeolita, ablandando el agua y quitando contaminantes orgánicos, o metálicos indeseables. Finalmente, el agua que pasa por ese último filtro es sometida a un proceso de cloración para evitar la formación de patógenos o bacterias en la misma y utilizarla para medios domésticos, la cantidad de cloro, sólidos disueltos, o minerales en el agua deben de ser menores en los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 [5] para validar el filtro.

Análisis Físicoquímico.

La Tabla 1 representa los resultados obtenidos para pH, temperatura, dureza, cloruros, sólidos disueltos totales (SDT) y para los contenedores 1,2 y 3 antes de ser evaluadas por el filtro diseñado, de forma general el agua de lluvia presenta un carácter ligeramente alcalino o alcalino, lo cual es congruente debido a la naturaleza del agua de lluvia [10], en cuestión a la temperatura, las altas temperaturas se deben a la época del año en la que sea realizaron las pruebas a excepción del contenedor 1 en donde se tiene una desviación estándar mayor. Sorprendentemente, los valores para cloruros en el contenedor 1 son los menores en cuestión a los 3 contenedores, a pesar de que se había limpiado con pastillas de hipoclorito anteriormente, se observa de igual forma la correlación entre el número de SDT con la dureza; a mayor nivel de dureza, mayor cantidad de iones, por lo tanto, una mayor cantidad de SDT. Además, si observamos el contenedor 2 y 3, los resultados son muy parecidos, lo cual nos indica de forma gratificante que el uso de la malla para eliminar objetos macroscópicos, no afectan las características del agua. Finalmente, todos los valores tanto de SDT y cloruros son menores al límite permisible para agua potable de la NOM [5] y para el caso de la dureza, los contenedores 2 y 3 están ligeramente arriba de los límites recomendados igualmente por la NOM [5].

En la Tabla 2, se decidió tomar el agua del Contenedor 2 y 3 presentar los resultados obtenidos de los mismos parámetros, una vez pasadas por todas las etapas del filtro diseñado. Podemos observar que el valor del pH a lo largo de los filtros permanece cerca de un valor neutro, a medida que el agua de lluvia pasaba por cada uno de los filtros, observamos un aumento en la cantidad de SDT y, por tanto, la dureza, que, si bien no es lo esperado, es debido a un error al omitir el lavado previo de la zeolita. Respecto a los valores encontrados para cloruros, a pesar de que al final se realiza una cloración del agua, los valores obtenidos siguen siendo mucho menores a los recomendados por la NOM para agua potable, lo cual es una excelente señal, además de que cumplió con la finalidad de eliminar parte de la turbidez, eliminar olores en ella y aún más importante, tener un control microbiológico del agua. Cabe mencionar que esto es solamente el primer prototipo realizado por parte del grupo, pero se encuentran resultados valiosos e interesantes, que pueden dar pauta a la creación de nuevos y más sofisticados filtros, teniendo así mejores resultados.

Tabla 1. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de agua de lluvia de los contenedores 1,2,3 en la etapa pre-filtrado.

Parámetro	Contenedor 1	Contenedor 2	Contenedor 3
pH	7.42 ± 0.17	7.28 ± 3.18	5.46 ± 3.16

Temperatura (°C)	21.47 ± 12.41	29.03 ± 0.94	29.60 ± 0.42
SDT (mg/L)	53.55 ± 1.07	97.92 ± 0.60	91.31 ± 0.80
Dureza (mg/L)	206.85 ± 24.97	427.05 ± 24.97	413.71 ± 9.44
Cloruros (mg/L)	8.78x10 ⁻³ ± 5.88x10 ⁻⁴	2.13x10 ⁻³ ± 7.28x10 ⁻⁴	2.06x10 ⁻³ ± 7.28x10 ⁻⁴

Tabla 2. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de agua de lluvia del contenedor 2 y 3 en la etapa post-filtrado.

Parámetro	Agua sin filtrar	Filtro 1	Filtro 2
pH	6.94	7.56	7.09
Temperatura (°C)	24.10	23.90	25.40
SDT (mg/L)	64.64	90.88	377.6
Dureza (mg/L)	260.24 ± 28.31	493.78 ± 24.97	1401.27 ± 43.24
Cloruros (mg/L)	14.77x10 ⁻³ ± 4.42x10 ⁻⁴	2.06x10 ⁻³ ± 7.28x10 ⁻⁴	60.61x10 ⁻³ ± 5.01x10 ⁻⁴

La recirculación de las muestras como se propuso en un inicio será un factor clave para la obtención de mejores resultados, además de buscar la obtención de un afluente constante al momento de realizar las pruebas, el proyecto presenta muchas perspectivas, dado que la finalidad última es adaptarlo a un captador de agua que se tiene en la misma unidad escolar. La calidad del agua cambia constantemente de acuerdo con la cantidad y la intensidad de la lluvia, por eso también decidimos presentar los resultados con su variación estándar.

En la figura 3. Se observa de manera esquemática los pasos realizados desde la toma de muestra, hasta la cloración del agua tomando mediciones fisicoquímicas en cada etapa del filtro, así como la recirculación del agua en los filtros.

Respecto a uso de esta agua filtrada, la finalidad inmediata es que sea utilizados para riego de plantas alrededor de la escuela, uso sanitario o incluso para lavar autos, como lo recomienda la bibliografía [11]. Creemos que, para poder diversificar sus usos, sería necesario realizar más pruebas y buscar la forma de medir la eficacia del filtro; parámetros como el color o la turbidez pueden ser medibles, los cuales pueden ayudar al refinamiento del método y aumentar los parámetros para las pruebas fisicoquímicas. Es importante tener en cuenta estas perspectivas para futuros proyectos.



Figura 3. Esquema general del análisis de las muestras.

Conclusiones

La propuesta de un filtro acoplado a un sistema captador de agua de lluvia presenta una alternativa efectiva para la reutilización de agua.

Se desarrolló un filtro capaz de tratar agua captada de lluvia y que cumple con los estándares de calidad indicados en la norma para el uso de agua tipo doméstico, presentando una posibilidad para su almacenaje y reúso en la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato.

Agradecimientos

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado de la Universidad de Guanajuato (DAIP-UG) por las becas otorgadas a los alumnos participantes en el proyecto.

Al Dr. José Juan Carreón Barrientos por su asesoría y colaboración activa.

A los estudiantes de Servicio Social Universitario Leonel Waldo López, Cesar Roberto Rocha Romo y Emilio Licea Barroso, por su apoyo a las actividades desarrolladas en el proyecto

A la Dirección de la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato por facilidades brindadas para la realización del proyecto.

Bibliografía/Referencias

1. Liu, X., et al., *Membrane technology for rainwater treatment and reuse: A mini review*. 2021. **2**: p. 51-63.
2. Esparza, M.J.S., *La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras*. 2014(89): p. 193-219.
3. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema), I.U.i.I.I.d.R.R.i., *Cosechar la lluvia, Manual para instalarlo en tu vivienda*. Sedema/iu/irri. México. 2020.
4. Yu, C. and X. Han. *Adsorbent material used in water treatment-a review*. in *2015 2nd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences*. 2015. Atlantis Press.
5. DE, S.D.A.Y.D. and I. MONTERREY, *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA PREFACIO*.
6. Huamani Areche, E. and E.K. Izarra Casavilca, *CONCENTRACIÓN DE LA DUREZA EN EL AGUA POTABLE Y SU RELACIÓN CON LA PREVALENCIA DE LITIASIS RENAL EN LA REGIÓN DE HUANCAMELICA*. 2021.
7. Vinasco, J., D. Jaramillo, and R.J.U.d.V.D.T.Q.S.d.C. BTANCOURT, *Análisis de cloruros*. 2007.
8. Bhatnagar, A., et al., *An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications*. 2013. **219**: p. 499-511.
9. Wang, S. and Y.J.C.e.j. Peng, *Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment*. 2010. **156**(1): p. 11-24.
10. Wilbers, G.-J., et al., *Effects of local and spatial conditions on the quality of harvested rainwater in the Mekong Delta, Vietnam*. 2013. **182**: p. 225-232.
11. Sandoval, A.D.O., et al., *Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment*. 2019. **30**: p. 100453.