

Filtro de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: diseño de un sistema en serie por etapas

Ricinus communis husk filter and charcoal for the treatment of hydrocarbon-contaminated water: design of a series system in stages

Marín-Velásquez, T.D. ^a, Heredia-Jiménez, V.I. ^{b1} y Alcarraz-Curi, M. ^{b2}

^aInnova Scientific S.A.C. Lima, Perú. E-mail: tmarin@innovascientific.com

^bUniversidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. E-mail: ^{b1}vherediaj@unmsm.edu.pe, ^{b2}biomac_20@hotmail.com

Recibido: 22/02/2019

Aceptado: 27/05/2019

Publicado: 31/07/2019

Citar como: Marín-Velásquez, T.D., Heredia-Jiménez, V.I., Alcarraz-Curi, M. (2019). *Ricinus communis* husk filter and charcoal for the treatment of hydrocarbon-contaminated water: design of a series system in stages. *Ingeniería del agua*, 23(3), 187-198. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.11426>

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar un sistema de tres filtros en serie, usando cascarillas de *Ricinus communis* y carbón vegetal. Se construyó cada filtro con tubos de plástico PVC y se colocaron los paquetes filtrantes granulares, dos de cascarilla y uno de carbón vegetal, para filtrar el agua de manera descendente por gravedad. Se utilizó agua contaminada con 5 y 10% Diésel y se tomaron muestras a la salida de cada uno para medir las variables SST y AyG, mediante las normas ASTM D5907 y EPA Method 1664 A. Los ensayos se hicieron por triplicado, con un diseño factorial con prueba ANAVA y DMS de Fisher con significancia $\alpha=0.05$. El sistema filtrante fue eficiente para disminuir los parámetros a valores permitidos por las normas ambientales peruanas, siendo más eficiente para AyG. Las eficiencias mostraron diferencias significativas por Etapas de filtración, pero fueron iguales en función al % Diésel.

Palabras clave | Material filtrante; *Ricinus communis*; agua contaminada; hidrocarburos; filtración; carbón vegetal.

ABSTRACT

The objective of research was to evaluate a system of three filters in series, using shells of *Ricinus communis* and charcoal. Each filter was constructed with PVC plastic tubes and the granular filter packs, two of husk and one of charcoal, were placed to filter the descending water by gravity. Water contaminated with 5 and 10% Diesel was used and samples were taken at the each filter exit of to measure the TSS and Oil and Greases variables, using of ASTM D5907 and EPA Method 1664 A standards. The tests were done in triplicate, with a factorial ANOVA design and Fisher's LSD test with significance $\alpha=0.05$. The filtering system was efficient to reduce the parameters to values allowed by the Peruvian environmental norms, being more efficient for AyG. The efficiencies showed significant differences by filtration stages, but were equal for % Diesel.

Key words | Filter material; *Ricinus communis*; contaminated water; hydrocarbons; filtration; charcoal.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de agua por hidrocarburos es un problema recurrente en la actualidad, sobre todo por ser los derivados del petróleo la principal fuente de energía en el mundo. Debido a la gran demanda de los hidrocarburos como fuente de energía, los mismos tienden a contaminar con bastante frecuencia como resultado de la exploración, producción, mantenimiento, transporte, almacenamiento y liberación accidental, lo que genera importantes impactos tanto para los humanos como para la naturaleza en general (Ahmed y Fakhruddin, 2018). La contaminación por hidrocarburos es un problema serio por los componentes tóxicos que se encuentran en el petróleo y que también se encuentran en sus derivados. Cuando los hidrocarburos se mezclan con el agua, algunos pueden solubilizarse en cierta medida (como el benceno) causando problemas de salud a las personas, entre ellos el cáncer (Akpor et al., 2014).

El tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos, puede realizarse por procesos físicos, químicos y biológicos. La filtración está clasificada dentro de los procesos físicos y consiste en la separación de los sólidos en suspensión dentro del agua al hacerla pasar a través de un medio poroso, que retiene los sólidos y deja pasar el agua. Los elementos que intervienen en la filtración son: un medio filtrante, un fluido con sólidos en suspensión y una fuerza, es decir una diferencia de presión que obligue al fluido pasar por el medio filtrante (Batista et al., 2016). Entre los medios filtrantes más utilizados se encuentran la graba y el carbón, los cuales han sido utilizados desde el principio de la civilización.

En el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos, la filtración se utiliza como tratamiento final para lograr los niveles establecidos por las normativas ambientales, las cuales dependen de cada país en particular. Los filtros granulares a base de cáscaras de nuez, son ampliamente utilizados en el tratamiento de agua en la industria petrolera, lo que indica el potencial de los filtros de origen vegetal. Lo anterior ha llevado a que se hayan investigado alternativas de medios filtrantes como la cáscara de mazorca de cacao (Sánchez, 2014) o la harina de tusa de maíz (Marín y Villarroel, 2016; Torres y Guaibor, 2015) que han demostrado tener alta eficiencia de retención de hidrocarburos. Otros materiales filtrantes que se han utilizado para la remoción de sólidos e hidrocarburos en el agua han sido la cáscara de coco (Ogbonna y Mafimisebi, 2016).

Otro medio filtrante que ha sido utilizado comúnmente para el tratamiento de aguas aceitosas es el carbón. Se sabe que el carbón vegetal era utilizado en la antigüedad para filtrar el vino por sus propiedades de alta porosidad y su capacidad para retener elementos de olor y algunas investigaciones como la de Almeyda y Córdova (2007) plantearon el uso del carbón vegetal para el tratamiento de agua potable, así mismo Marín y Villarroel (2016) utilizaron el carbón vegetal como medio filtrante para aguas contaminadas con petróleo. En los últimos tiempos se ha venido empleando el carbón activado como medio filtrante debido a su mayor superficie disponible la filtración (Sharma y Bhattacharya, 2017). El carbón activado puede obtenerse de diferentes fuentes vegetales e investigaciones como la de Manosalva (2016) han utilizado carbón activado de diferentes fuentes para el tratamiento de agua.

A partir del estudio de los antecedentes del uso de material vegetal como medio filtrante, se plantea la presente investigación en la cual se evalúa la cascarilla de *Ricinus communis* como medio filtrante para el tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos (Diésel) en combinación con el carbón vegetal. Se decidió estudiar estos materiales por ser abundantes y el caso particular de la cascarilla de *Ricinus communis* es un subproducto de la producción de aceite, el cual se desecha, por lo que es importante su estudio en otras áreas, sobre todo como material filtrante para procesar aguas de producción de petróleo destinadas a la disposición en cuerpos de aguas. Otra de sus ventajas es la disminución de costos relacionados con la adquisición de medios filtrantes como el caso de la cascarilla de nuez negra (*Juglans nigra*), la cual es de uso común en el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron frutos de *Ricinus communis* y se extrajeron las semillas. Las cascarillas se limpiaron y trituraron en un molino de martillo, luego se tamizaron para obtener un tamaño de partículas uniforme de 2 mm. Las cascarillas se secaron en estufa a 105°C y se almacenaron en envases de vidrio cerradas.

La muestra de carbón vegetal se obtuvo de un establecimiento comercial, se trituró en molino de martillo y se tamizó con malla de 2 mm para obtener un tamaño de partículas uniforme. El carbón fue sometido a lavado con agua utilizando un equipo de extracción Soxhlet y secado en estufa a 105°C. A ambos materiales filtrantes se le determinó la densidad mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D854 (2014).

Se construyeron tres filtros con tubos de PVC de 5.1 cm de diámetro y 50 cm de longitud, con un arreglo de medios filtrantes como se observa en la Figura 1. El flujo de agua fue descendente y por acción de la fuerza de gravedad.

El agua utilizada fue potable y se contaminó con 5 y 10% de Diésel mezclando mediante agitador mecánico, luego se dejó en reposo y se retiró manualmente el Diésel sobrenadante. A cada muestra de agua contaminada se le determinó el contenido de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en mg/L mediante la norma ASTM D5907 y el contenido de Aceites y Grasas (AyG) por extracción con n-hexano según la norma EPA Method 1664 A.

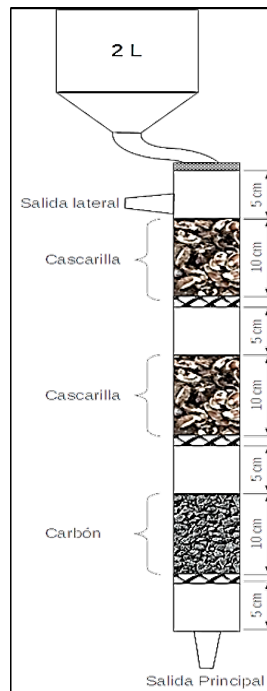


Figura 1 | Esquema del filtro construido.

Inicialmente a los filtros se les hizo pasar agua para humedecer los medios filtrantes y luego la muestra de agua contaminada al 5% se filtró a través de cada uno de los tres filtros, en un esquema en serie donde el filtrado del primer filtro (Etapa 1), se filtró a través del segundo filtro (Etapa 2) y luego el filtrado obtenido se filtró a través del tercer filtro (Etapa 3). Se utilizó un volumen de agua contaminada de 2 litros por filtración, calculándose la tasa superficial de filtración o carga hidráulica superficial, mediante la ecuación 1.

$$Tf = \frac{Q}{Af} \quad (1)$$

Dónde: Q representa el caudal volumétrico de agua en m^3/d ; Af representa el área superficial del medio filtrante en m^2 y Tf representa la tasa superficial de filtración en $m^3/m^2/d$.

Los filtros fueron sometidos a retrolavado con agua según el esquema de la figura 2 y se repitió el proceso de filtrado en serie. El procedimiento de retrolavado se repitió una vez más y se realizó un tercer filtrado. El retrolavado se realizó hasta que no se observó trazas de aceite en el agua de salida (≈ 1 hora).

Al término del primer ciclo de ensayos, se desmontaron los filtros, extrajeron los medios filtrantes y se limpiaron. Luego de secarlos, se volvieron a empaquetar con muestras nuevas de cascarilla y carbón vegetal, para repetir los ensayos realizados, pero esta vez se utilizó la muestra de agua contaminada con 10% Diésel.

En cada etapa de filtrado y por cada repetición, se obtuvo muestras de agua a las cuales se les determinaron los SST y AyG.

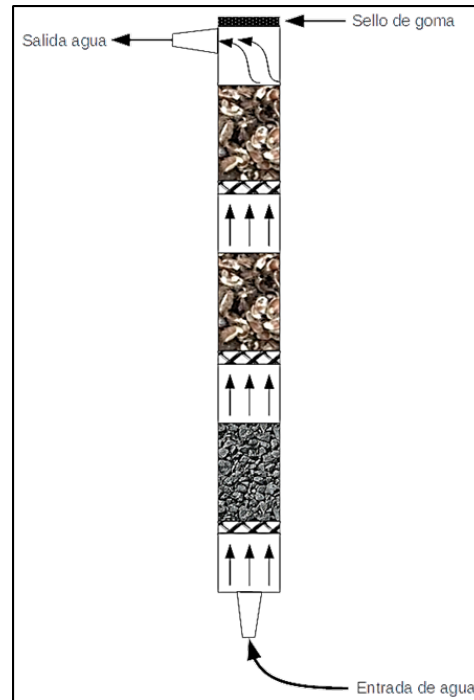


Figura 2 | Esquema del retrolavado con agua.

La eficiencia de remoción de SST y AyG en cada uno de las etapas de filtrado, se determinó a través de la ecuación 2, respecto a cada una de las propiedades medidas.

$$\%Ef = \frac{Pinicial - Pfinal}{Pinicial} \times 100 \quad (2)$$

Dónde: *Pinicial* representa la Propiedad inicial medida; *Pfinal* representa la Propiedad medida después del filtrado y *%Ef* representa la Eficiencia porcentual del filtro.

La eficiencia de remoción de contaminantes en función de la masa total de medio filtrante se determinó a través de la ecuación 3, respecto a cada una de las propiedades medidas.

$$Efm = \frac{masa\ inicial - masa\ final}{masa\ de\ medio\ filtrante} \quad (3)$$

Dónde: *masa inicial* representa de masa inicial del contaminante en mg; *masa final* representa la masa final del contaminante en mg; *masa de medio filtrante* representa la masa total de medio filtrante en g y *Efm* representa la eficiencia de remoción en mg/g.

El diseño experimental fue factorial con dos muestras de agua contaminada (5 y 10% Diésel), tres etapas de filtrado y tres repeticiones por ensayo. Lo anterior generó un total de 18 ensayos a los que se le determinaron dos propiedades (SST y AyG) para un total de 36 datos obtenidos. El análisis estadístico se basó en un análisis ANAVA multifactorial con test de rangos múltiples de Fisher (LSD), utilizando el software estadístico *Infostat* versión 2018, con la finalidad de establecer si los factores (Etapas de filtrado y porcentaje de contaminación) tienen influencia significativa sobre las variables (SST y AyG).

RESULTADOS

El agua utilizada para los ensayos de filtración fue caracterizada de acuerdo a las propiedades tomadas como base para medir la eficiencia del filtro propuesto, mostrándose los resultados en la Tabla 1.

Tabla 1 | Propiedades del agua utilizada.

| Tipo de agua | SST (mg/L) | AyG (mg/L) |
|----------------------------|------------|------------|
| Sin contaminar | 78 | 0 |
| Contaminada con 5% Diésel | 352 | 255 |
| Contaminada con 10% Diésel | 442 | 260 |

Se observa en la Tabla 1 que en el agua contaminada aumenta la cantidad de SST en relación al porcentaje de Diésel mezclado. El agua contaminada con 5% Diésel aumenta los SST en 274 mg/L y con 10% Diésel en 364 mg/L, respecto al agua sin contaminar. Entre las dos muestras de agua contaminadas la diferencia en SST fue de 90 mg/L, es decir que supera el valor inicial del agua. En relación a los valores de AyG, el agua sin contaminar no presenta hidrocarburos, lo que es lógico, ya que es agua potable, sin embargo luego de ser mezclada con Diésel, los valores de esta propiedad aumentan a 255 mg/L y 260 mg/L para las cantidades de 5 y 10% respectivamente, la poca diferencia se puede deber a la posible saturación del agua con 5% de Diésel, ya que el mismo tiene una solubilidad de 5 mg/L según la ficha técnica ICSC:1561 (2004) para combustible Diésel. Por lo tanto la cantidad de hidrocarburos en el agua contaminada se debe no sólo a los que se solubilizan, sino también a los que se dispersan en pequeñas gotas, cuya capacidad también es limitada.

Las propiedades medidas aumentan en el agua contaminada en función directa con la presencia de Diésel disperso dentro de la misma, es más notoria la relación entre los SST con la cantidad de hidrocarburos presentes en el agua, ya que en el caso de los AyG, la diferencia fue poca (5 mg/L). El aumento de los SST se debe a que el método utilizado, contabiliza las gotas de Diésel dispersas dentro del agua como parte de los sólidos suspendidos.

La densidad de los medios filtrantes fueron de 0.19 g/mL para la cascarilla de *Ricinus communis* y 0.35 g/mL para el carbón vegetal. Los filtros se empaquetaron con dos cantidades iguales de 38 g de cascarilla (un aproximado de 203 mL de volumen), lo que representa una cantidad de cascarilla por filtro de 76 g y con 71 g de carbón vegetal por filtro. En cuanto a la tasa de filtración superficial de los filtros, la misma fue de 118.4 m³/m²/d según resultado obtenido a partir de la ecuación 1.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos luego de medir las propiedades estudiadas en las muestras de agua filtradas en cada esquema de filtración.

Tabla 2 | Resultados de los ensayos de filtración.

| Repetición | Diésel (%) | Propiedad | Etapas 1 | Etapas 2 | Etapas 3 |
|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|
| 1 | 5 | SST | 162 | 48 | 28 |
| | 10 | | 223 | 94 | 46 |
| | 5 | AyG | 130 | 17 | 8 |
| | 10 | | 153 | 21 | 13 |
| 2 | 5 | SST | 176 | 34 | 27 |
| | 10 | | 245 | 85 | 48 |
| | 5 | AyG | 134 | 16 | 11 |
| | 10 | | 161 | 23 | 17 |
| 3 | 5 | SST | 163 | 41 | 24 |
| | 10 | | 219 | 82 | 53 |
| | 5 | AyG | 118 | 12 | 9 |
| | 10 | | 139 | 25 | 14 |

Se observa que los valores tanto de SST como de AyG, son mayores en la Etapa 1, comparado con los obtenidos en las Etapas siguientes. Los valores promedios de retención de los hidrocarburos calculados a partir de las medidas tomadas en las tres Etapas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 | Resultados promedios de las propiedades del agua filtrada.

| Diésel (%) | Propiedad | Etapa 1 | Etapa 2 | Etapa 3 |
|------------|-----------|---------|---------|---------|
| 5 | SST | 167 | 41 | 26 |
| | AyG | 127 | 15 | 9 |
| 10 | SST | 229 | 87 | 49 |
| | AyG | 151 | 23 | 15 |

Al igual que se observa en los valores individuales, los SST y AyG, aumentan con la cantidad de Diésel en el agua y disminuyen al pasar a través de las Etapas. En todos los casos a menor cantidad de Diésel, los resultados de las propiedades son menores. A partir de estos resultados, de calcularon las eficiencias en cada etapa mediante las ecuaciones 2 y 3, los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 | Eficiencias de remoción de hidrocarburos del filtro propuesto.

| Diésel (%) | Propiedad | %E _f | | | E _{fm} | | |
|------------|-----------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| | | Etapa 1 | Etapa 2 | Etapa 3 | Etapa 1 | Etapa 2 | Etapa 3 |
| 5 | SST | 52.6 | 75.4 | 36.6 | 1.3 | 2.1 | 2.2 |
| | AyG | 50.2 | 88.2 | 40.0 | 0.9 | 1.6 | 1.7 |
| 10 | SST | 48.2 | 62.0 | 43.7 | 1.4 | 2.4 | 2.7 |
| | AyG | 41.9 | 84.8 | 34.8 | 0.7 | 1.6 | 1.7 |

En la Tabla 4 se observa que las eficiencias sistema de filtrado en relación a los valores de SST estuvieron en un rango de 36.6 a 84.8% y para los valores de AyG el rango de eficiencias estuvieron entre 34.8 y 88.2%. En todos los casos Las eficiencias fueron mayores en la Etapa 2 por lo que se evidencia que puede ser utilizado en un sistema de tratamiento continuo de aguas contaminadas con hidrocarburos. El sistema de filtrado propuesto fue más eficiente para la remoción de AyG en comparación con los resultados de los SST. Los medios filtrantes granulares elaborados con material vegetal son utilizados para filtrar agua con hidrocarburos, por su capacidad de retención de los mismos, la más utilizada es la cascarilla de nuez, lo que explicaría la mayor eficiencia del filtro para remover los AyG del agua.

En cuanto a los valores de *E_{fm}*, se observa que la eficiencia másica aumenta al aumentar las etapas de filtración, siendo mayores en la Etapa 3, para cada una de las propiedades. Al contrario del porcentaje de eficiencia calculado de forma volumétrica, el filtro fue más eficiente para la remoción de SST respecto a la cantidad de medio filtrante, siendo más eficiente a mayor cantidad de Diésel en el agua. La remoción de AyG se mantiene constante en las Etapas 2 y 3 independientemente del porcentaje de Diésel en el agua, como se observa en la Etapa 2 con 1.6 mg/g y en la Etapa 3 de 1.7 mg/g.

El resultado del ANAVA respecto a los valores de SST, se muestran en la Tabla 5. El nivel de significancia es de 0.05 lo que significa que el nivel de confianza del análisis es de 95%.

Tabla 5 | Resultado del análisis ANAVA respecto a SST.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------------|----------|----|----------|--------|---------|
| Etapa de Filtrado | 88569.33 | 2 | 44284.67 | 331.78 | <0.0001 |
| % Diésel | 8450.00 | 1 | 8450.00 | 63.31 | <0.0001 |
| Error | 1868.67 | 14 | 133.48 | | |
| Total | 98888.00 | 17 | | | |

El p-valor del análisis ANAVA menor a 0.05 para ambos factores, indica que tienen influencia estadísticamente significativa sobre los valores de SST obtenidos. Lo que significa que los resultados son dependientes tanto de la Etapa de filtrado, como del porcentaje de contaminación con Diésel.

Para corroborar lo anterior, se realizó el contraste de múltiples rangos de Fisher (LSD), mostrándose los resultados en las Tabla 6 y 7 para los factores Modo de Filtrado y % Diésel respectivamente.

Tabla 6 | Análisis de múltiples rangos de Fisher para SST ($\alpha=0.05$ LSD= 14.30) por Etapa de filtrado.

| Etapa de Filtrado | Medias | n | E.E | |
|-------------------|--------|---|------|---|
| Etapa 3 | 37.67 | 6 | 4.72 | A |
| Etapa 2 | 64.33 | 6 | 4.72 | B |
| Etapa 1 | 198.00 | 6 | 4.72 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los resultados obtenidos de SST por Etapa de filtrado muestran diferencias estadísticamente significativas, debido a que las diferencias de medias entre ellas son mayores a la diferencia mínima significativa, lo que las ubican en letras diferentes, es decir se corrobora la influencia de la Etapa de filtrado sobre los SST.

Tabla 7 | Análisis de múltiples rangos de Fisher para SST ($\alpha=0.05$ LSD= 11.68) por % Diésel.

| % Diésel | Medias | n | E.E | |
|----------|--------|---|------|---|
| 5 | 78.33 | 9 | 3.85 | A |
| 10 | 121.67 | 9 | 3.85 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los % Diésel también influyen sobre los resultados de SST de forma estadísticamente significativa, ya que las diferencias de medias superan el valor de LSD y como se observa en la Tabla 7, se identifican con letras diferentes.

En la Tabla 8, se muestra el resultado del ANAVA respecto a los valores de AyG obtenidos para un nivel de significancia de 0.05 y confianza de 95%.

Tabla 8 | Resultado del análisis ANAVA respecto a AyG.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------------|----------|----|----------|--------|---------|
| Etapa de Filtrado | 61320.78 | 2 | 30660.39 | 599.23 | <0.0001 |
| % Diésel | 684.50 | 1 | 684.50 | 13.38 | 0.0026 |
| Error | 716.33 | 14 | 51.17 | | |
| Total | 62721.61 | 17 | | | |

Los resultados de p-valor < 0.05 indican que ambos factores (Etapa de Filtrado y % Diésel) tienen influencia estadísticamente significativa sobre los valores obtenidos de AyG. El factor más influyente en este caso es Etapa de Filtrado por presentar el p-valor más bajo al compararlo con el obtenido para % Diésel.

El análisis de múltiples rangos de Fisher para la variable AyG arrojó los resultados que se muestran en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9 | Análisis de múltiples rangos de Fisher para AyG ($\alpha=0.05$, LSD=8.9) por Modo de Filtrado.

| Modo de Filtrado | Medias | n | E.E | |
|------------------|--------|---|------|---|
| Etapa 3 | 12.00 | 6 | 2.92 | A |
| Etapa 2 | 19.00 | 6 | 2.92 | A |
| Etapa 1 | 139.17 | 6 | 2.92 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En la Tabla 9 se observa que en el caso de AyG, los resultados obtenidos en las Etapas 2 y 3 fueron estadísticamente iguales (A), debido a que la diferencia entre las medias fue menor a la LSD. En el caso de los resultados obtenidos en la Etapa 1, se observa que fueron diferentes a los reportados en las otras dos Etapas, identificándose con una letra diferente (B).

Tabla 10 | Análisis de múltiples rangos de Fisher para AyG ($\alpha=0.05$ LSD=7.2) por % Diésel.

| % Diésel | Medias | n | E.E | |
|----------|--------|---|------|---|
| 5 | 50.56 | 9 | 2.38 | A |
| 10 | 62.89 | 9 | 2.38 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Al igual que en el caso del análisis de SST, en el caso de AyG, se observa que el porcentaje de Diésel influye en los resultados obtenidos, es decir existe dependencia de la variable con este factor, por lo que se identifican con diferentes letras.

Como cada Etapa mostró valores de eficiencia diferentes, se procedió a realizar análisis ANAVA de las eficiencias respecto a los factores principales (Etapas de Filtrado y % Diésel) mostrándose los resultados en la Tabla 11.

Tabla 11 | Resultados del análisis ANAVA respecto a las eficiencias por Etapas.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------------|---------|----|---------|--------|---------|
| Etapa de Filtrado | 2747.89 | 2 | 1373.95 | 447.30 | 0.0022 |
| % Diésel | 47.60 | 1 | 47.60 | 15.50 | 0.0589 |
| Error | 6.14 | 2 | 3.07 | | |
| Total | 2801.64 | 5 | | | |

En la Tabla 11, se observa que el factor Etapa de Filtrado influye de manera estadísticamente significativa sobre las eficiencias ($p\text{-valor}=0.0022$) es decir estadísticamente hay diferencias en las eficiencias de cada Etapa. Por el contrario, el $p\text{-valor}$ correspondiente al factor % Diésel es mayor de 0.05 (0.0589) lo que indica que las eficiencias no dependen de este factor. Para sustentar lo anterior, se realizaron los contrastes de rangos de Fisher con los valores promedios de eficiencia para la variable AyG por ser esta la de mayor importancia en el estudio, ya que el objetivo es tratar aguas de producción petrolera contaminada con hidrocarburos, cuyos resultados se muestran en las Tablas 12 y 13.

Tabla 12 | Análisis de múltiples rangos de Fisher para eficiencias ($\alpha=0.05$ LSD=7.54) por Etapa de filtrado.

| Etapa de Filtrado | Medias | n | E.E | |
|-------------------|--------|---|------|---|
| Etapa 3 | 37.40 | 2 | 1.24 | A |
| Etapa 1 | 46.05 | 2 | 1.24 | B |
| Etapa 2 | 86.50 | 2 | 1.24 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Como se observó en la Tabla ANAVA (Tabla 11), existen diferencias significativas entre las eficiencias calculadas en cada etapa con un nivel de significancia de 0.05 (nivel de confianza de 95%).

Tabla 13 | Análisis de múltiples rangos de Fisher para eficiencias ($\alpha=0.05$ LSD=6.16) por % Diésel.

| % Diésel | Medias | n | E.E | |
|----------|--------|---|------|---|
| 10 | 53.83 | 3 | 1.01 | A |
| 5 | 59.47 | 3 | 1.01 | A |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Aunque en la Tabla 13, se observa una diferencia entre las eficiencias respecto al factor % Diésel, el análisis estadístico indica que la misma no es significativa, por lo que ambos valores se consideran iguales. Lo anterior hace inferir, que en cuanto a la

eficiencia promedio del sistema de filtrado en serie, esta no depende de la cantidad de Diésel con que se ha contaminado el agua, bajo las condiciones del estudio.

DISCUSIÓN

El Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Ministerio de Salud del Perú (DS N° 031-2010-SA) del año 2011, no establece un valor máximo para los SST en el agua potable, pero si establece un máximo 0.5 mg/L de Aceites y Grasas, sin embargo el Decreto supremo N° 002-2008-MINAM (2008) establece un valor máximo en un rango entre 25 mg/L y 50 mg/L. Lo anterior muestra que el agua que se utilizó en la investigación presentó un valor de SST superior al límite máximo, por lo que no cumple con los parámetros establecidos para el agua potable con un contenido de sólidos de 78 mg/L, lo que se puede deber a deficiencias en las plantas potabilizadoras o a posible contaminación durante la distribución a través de las tuberías. En cuanto a los aceites y grasas, no se evidenció su presencia por lo que el agua si cumple con este parámetro. Luego de la contaminación con Diésel, el valor de SST se elevó a límites que superan incluso los valores permisibles para aguas tratadas (352 y 442 mg/L), por otra parte el contenido de AyG aumentó considerablemente ubicándose en niveles no permitidos por la norma, lo que evidencia el nivel de contaminación del agua utilizada. El aumento de los SST en el agua contaminada con Diésel, concuerda con la conclusión de Atekwana et al. (2004) quienes mencionan que los sólidos totales aumentan respecto a la contaminación con hidrocarburos.

Los valores obtenidos del agua contaminada tampoco la hace apta para descarga en cuerpos de agua, de acuerdo a lo que establece la Norma de Calidad del Agua y Control de Descargas (AG-CC-O1) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación – FAO, la cual establece que los vertidos industriales deben contener un máximo de 50 mg/L de SST y entre 10 y 20 mg/L de AyG. Se observa entonces que al contaminar al agua con Diésel, esta no queda en condiciones de ser vertida a un cuerpo de agua, por lo que necesita de un tratamiento previo para su disposición.

Las condiciones del proceso de filtración, en base a su velocidad superficial indican que se trabajó con un filtro de flujo superficial rápido, lo que se debe principalmente a las características granulométricas de los medios filtrantes con diámetro de partículas de 2 mm. Lo anterior basado en lo que se establece Suárez, Jácome y Ures (2014) en su informe sobre filtros granulares, donde mencionan que los filtros con diámetro de partículas mayores a 0.35 mm son considerados filtros rápidos, con tasas de filtración mayores a 10 m³/m²/d.

Los SST disminuyeron al filtrar el agua contaminada, sin embargo se observa que cuando se utiliza una Etapa de filtrado (Etapa 1), los valores obtenidos son superiores (> 50 mg/L) al límite establecido por las normas. Al pasar el agua filtrada en la Etapa 1 por las otras dos Etapas, los valores de SST del agua filtrada disminuyen hasta valores menores al límite, a excepción de la muestra contaminada con 10% Diésel en la Etapa 2, sin embargo la menor eficiencia de remoción obtenida de 36.6% es superior al reportado por Galindo et al. (2016) de 23% al utilizar un filtro a base de conchas marinas. Las eficiencias totales del proceso en serie de 92.6% para 5% Diésel y 88.9% para 10% Diésel, también fueron mayores a la reportada por Gualteros y Chacón (2015) de 82% al utilizar carbón activado como material filtrante para el tratamiento de agua. Bernal-Martínez et al. (2011) al utilizar un filtro elaborado con carbón activado y arena sílice, reportaron un porcentaje de remoción de sólidos de 94%, el cual es superior al máximo obtenido, lo que demuestra que el filtro utilizado por los autores citados es más eficiente que el propuesto en esta investigación, aunque la diferencia es de solo 1.4%.

Luego de la filtración de las muestras de agua contaminadas a través del sistema de filtrado propuesto, se observa en la Tabla 2, que en la Etapa 1, la disminución de los parámetros medidos fue baja, quedando todos los valores mayores a los límites permisibles para el vertido del agua. El resultado está acorde con el obtenido por Ogbonna y Mafimisebi (2016), quienes al utilizar cáscara de coco (*Cocos nucifera*) como adsorbente para filtrar agua contaminada con Diésel, concluyeron que la adsorción con el medio filtrante, no era favorable para el tratamiento del agua potable contaminada con hidrocarburos, utilizando una sola etapa de filtrado.

Al filtrar el agua a través de las Etapas 2 y 3, se observa que los valores obtenidos disminuyen de forma significativa. Los resultados de AyG al filtrar el agua contaminada por la Etapa 2, en el caso del agua contaminada con 5% Diésel, estuvieron dentro de los límites establecidos para el vertido en fuentes de agua (10 – 20 mg/L) lo que demuestra la eficiencia del filtrado. Para el agua

contaminada con 10% Diésel, el valor promedio fue de 23 mg/L, que aunque es superior al valor límite máximo, también se muestra como aceptable en función a la eficiencia de remoción que fue de 84.8%.

Al filtrar el agua por la Etapa 3, se observa que los valores de AyG para ambas concentraciones de Diésel, presentaron valores dentro de los límites 9 y 15 mg/L para 5 y 10% Diésel respectivamente. Lo anterior demuestra que el de filtración en serie con tres etapas, mejora la capacidad de adsorción del medio filtrante, llegando al alcanzar eficiencias máximas entre 94.2 y 96.5%. Estas eficiencias son concordantes con las obtenidas por Ayotamuno et al. (2006) quienes obtuvieron con carbón activado eficiencias de adsorción superiores a 96% y fueron superiores a las reportadas por Antwi-Akomeah et al. (2018) quienes obtuvieron porcentajes de remoción de 69.7% utilizando fibra de bambú y 90.72% utilizando fibra de coco. De igual forma Srinivasan y Viraraghavan (2008) reportaron valores de porcentaje de adsorción de aceite mineral utilizando cascarilla de nuez con un máximo de 74%, valor también superado en esta investigación. Srinivasan y Viraraghavan (2010), también utilizaron como medios filtrantes biomasa de *M. rouxii* y *A. coerulea*, obteniendo eficiencias entre 77 y 93%, valores inferiores a los obtenidos al utilizar el sistema de filtrado con tres etapas, coincidiendo con los resultados obtenidos al utilizar solo dos etapas.

Estadísticamente se comprobó que los factores Etapa de Filtrado y %Diésel influyeron de manera significativa sobre las dos variables dependientes, SST y AyG. En el caso específico de AyG, los resultados promedio registrados al realizar el filtrado con las Etapas 2 y 3, no mostraron diferencias significativas por lo que se concluye que para disminuir los aceites presentes en el agua contaminada hasta los valores permisibles, se puede utilizar indistintamente dos o tres etapas, obteniéndose resultados estadísticamente iguales.

Los resultados también mostraron que la máxima eficiencia se obtuvo en la Etapa 2 y que la misma disminuye en la Etapa 3. Por lo que se puede decir en base a los resultados estadísticos que el filtrado por etapas tiene influencia sobre la eficiencia, siendo la Etapa 2, la de mejor desempeño. Lo anterior es concordante con la conclusión de Di Bernardo y Di Bernardo (2006) quienes al evaluar un filtro en dos etapas concluyeron que era eficiente para disminuir los sólidos suspendidos en el agua (turbidez). Se ha comprobado que los filtros en varias etapas aumentan la eficiencia de remoción de contaminantes al compararlos con filtros simples (una sola etapa). El sistema construido logró eficiencias altas respecto a la remoción de los SST en comparación con valores como los reportados por Vega (2013), quien al utilizar un filtro con múltiples etapas a base de gravilla y arena, alcanzó 36% de eficiencia, valor bajo en comparación con las mínimas eficiencias obtenidas en esta investigación (36.6 y 43.7%) reportadas en la Etapa 3.

En otra investigación, Pereira et al. (2013), reportaron eficiencias en un filtro por etapas utilizado para la remoción de contaminantes en el agua, de más de 98%, valor superior al máximo promedio alcanzado en la presente investigación que fue de 96.5%, sin embargo se puede considerar que la diferencia de 1.5% es aceptable para decir que los resultados fueron equivalentes. Además se demostró que la eficiencia del sistema filtrante fue independiente del porcentaje de Diésel utilizado para contaminar el agua y si se toma en cuenta que para ambas concentraciones de contaminantes, se logró que el agua cumpliera con los parámetros para su disposición, se puede concluir que la combinación de la cascarilla de *Ricinus communis* y el carbón vegetal pueden ser utilizados como materiales filtrantes en el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos.

CONCLUSIONES

A mayor concentración de Diésel en el agua, se observó que la eficiencia del sistema filtrante disminuye, sin embargo los valores de eficiencia son altos y tanto los valores de SST como los AyG obtenidos al final se encuentran dentro de los límites permitidos según las normas ambientales peruanas.

Estadísticamente se concluyó que los valores de SST son dependientes de las Etapa dentro del sistema de filtración y del porcentaje de Diésel, mostrando diferencias significativas en todos los casos (p -valor < 0.05)

En cuanto a los resultados finales de AyG en el agua, los resultados mostraron que los mismos son dependientes de las Etapas de filtrado y del porcentaje de Diésel en el agua, sin embargo la prueba de rangos múltiples de Fisher demostró que las Etapas 2 y 3 generan valores de AyG estadísticamente iguales, por lo tanto para esta variable, solo se requieren de dos Etapas.

Las eficiencias obtenidas por Etapas fueron estadísticamente diferentes, destacándose la Etapa 2 con la mayor eficiencia. En el caso de la eficiencia promedio en función de los porcentajes de Diésel, se concluyó, tomando como base el resultado estadístico, que ésta no se vio influenciada por el factor, ya que el p-valor fue mayor a 0.05 y el contraste de rango indicó que para los dos valores de %Diésel, los valores fueron estadísticamente iguales.

De los resultados obtenidos en la investigación, se puede concluir que el filtro por etapas construido con la combinación de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal representa un medio filtrante alternativo eficiente para la remoción de hidrocarburos y sólidos de aguas contaminadas cuando se realiza el filtrado en un sistema en serie con tres filtros. El sistema filtrante puede someterse a retrolavado con agua, manteniendo su eficiencia.

Al ser un estudio preliminar de factibilidad de uso de un material filtrante alternativo, aun se debe estudiar el tiempo de vida útil del mismo y se plantea una modificación del sistema para volver a filtrar el agua de retrolavado en un sistema similar al que sería utilizado a nivel industrial, con lo que se lograría demostrar no solo la eficiencia de los medios filtrantes, sino su aplicabilidad.

REFERENCIAS

- Ahmed, F., Fakhruddin, A.N.M. 2018. A Review on Environmental Contamination of Petroleum Hydrocarbons and its Biodegradation. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 11(3), 1-7. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.11.555811>
- Akpor, O.B., Okolomike, U.F., Olaolu, T.D., Aderiye, B.I. 2014. Remediation of polluted wastewater effluents: Hydrocarbon Removal. *Trends in Applied Sciences Research*, 9(4), 160-173. <https://doi.org/10.3923/tasr.2014.160.173>
- Almeyda, C.L.E., Córdova, R.A. 2007. *Tratamiento alternativo de aguas residuales domésticas mediante filtros consecutivos para poblaciones rurales* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Antwi-Akomeah, S., Fei-Baffoe, B., Belford, E.J.D., Borigu, M. 2018. Hydrocarbon contaminated water remediation using a locally constructed multi-stage bioreactor incorporated with media filtration. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(4), 413-426. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.003>
- ASTM D5907. 2018. *Standard Test Methods for Filterable Matter (Total Dissolved Solids) and Nonfilterable Matter (Total Suspended Solids) in Water*. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D5907-18>
- Atekwana, E.A., Atekwana, E.A., Rowe, R.S., Werkema, D.D., Legall, F.D. 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 281-294. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.08.003>
- Ayotamuno, M.J., Kogbara, R.B., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D. 2006. Petroleum contaminated ground-water Remediation using activated carbón. *Applied Energy*, 83, 1258-1264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.01.004>
- Batista, A., Cárdenas, O., Castillo, J., Madrid, K., Martínez, C., Tejedo, A. 2016. Diseño y construcción de filtro multicámaras horizontal por gravedad para tratamiento de efluentes industriales. *Revista de Iniciación Científica*, 2(2), 108-114.
- Bernal-Martínez, L.A., Solís-Morelos, C., Linares-Hernández, I., Barrera-Díaz, C., Colín-Cruz, A. 2011. Tratamiento de agua residual municipal por un sistema fisicoquímico y oxidación química en flujo continuo. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(2), 69-81.
- Decreto Supremo N° 002-2008. 2008. *Estándares nacionales de calidad del agua*. Perú: MINAM.
- Di Bernardo, A., Di Bernardo, L. 2006. Performance of two-stage filtration system for treating high turbidity wáter. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 55, 7-8. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.042>
- EPA Method 1664A. 2000. *Extractable Material (SGT-HEM; Non-polar Material) by Extraction and Gravimetry*. U.S. Environmental Protection Agency.

- Ficha técnica ICSC: 1561. 2004. *Fichas Internacionales de Seguridad Química. Combustibles. Diesel No. 2. Gasoil - sin especificar*. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/401a500/1561.pdf> [Último acceso: febrero de 2019].
- Galindo, A., Toncel, E., Rincón, N. 2016. Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *Revista ION*, 29(2), 39-50. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016003>
- Gualteros, L.J., Chacón, M.A. 2015. *Estudio de la eficiencia de lechos filtrantes para la potabilización de agua proveniente de la quebrada la despensa en el municipio guaduas Cundinamarca vereda la yerbabuena* (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- Monosalva, K.C. 2016. *Efecto del carbón activado en la turbidez del agua del río sector puente Moche – 2016* (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú.
- Marín, T., Villarroel, W. 2016. Evaluación de un filtro a base de harina de tusa de maíz (*Zea mays*) y carbón vegetal para el tratamiento de agua contaminada con petróleo. *Geominas*, 44(70), 91-95.
- Ministerio de Salud del Perú. 2011. *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. DS N° 031-2010-SA, Lima, Perú.
- Ogbonna, O.C., Mafimisebi, O.P. 2016. Treatment of Hydrocarbon Contaminated Drinking Water in Niger Delta, Nigeria Using Low-Cost Adsorbents (Coconut Shell). *Civil and Environmental Research*, 8(3), 129-146.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación – FAO. 2001. *Norma AG-CC-01 sobre calidad del agua y control de descargas*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/dom60779.pdf> [Último acceso: febrero de 2019].
- Pereira, E., Rosa, L.M., Borges, R.M., Sánchez, I.A. 2013. Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas. *Interciencia*, 38(10), 726-732.
- Sánchez, E.J. 2014. *Propuesta de elaboración y comercialización de filtros adsorbentes para aguas contaminadas a partir de la cáscara de la mazorca de cacao como adsorbente en la ciudad de Guayaquil* (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Sharma, S., Bhattacharya, A. 2017. Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied Water Science*, 7, 1043-1067. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0455-7>
- Srinivasan, A., Viraraghavan, T. 2008. Removal of oil by walnut shell media. *Bioresource Technology*, 99, 8217-8220. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.072>
- Srinivasan, A., Viraraghavan, T. 2010. Oil removal from water using biomaterials. *Bioresource Technology*, 101, 6594-6600. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.079>
- Suárez, J., Jácome, A., Ures, P. 2014. *Filtración en medio granular. Serie: tratamientos terciarios*. FT-TER-001, La Coruña, España. <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Filtración+en+medio+granular.pdf>
- Torres, N., Gaibor, K. 2015. *Estudio de la aplicación del olote o tusa de maíz para la reducción del color en aguas residuales de la hilandería guijarro cantón guano* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Vega, H.A. 2013. *Evaluación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado en la hacienda Majavita (Socorro, Santander)* [Tesis de maestría]. Universidad de Manizales, Socorro, Colombia.