

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-01-01

Artículos

Capacidad de retención de hidrocarburos del endocarpio de coco en aguas aceitosas

Hydrocarbon holding capacity of the coconut endocarp in oily water

Tomás Darío Marín-Velásquez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3334-5895>

Edwin Julio Cóndor-Salvatierra², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3244-7424>

¹Departamento de Investigación Científica, Innova Scientific SAC, Lima, Perú, tmarin@protonmail.com

²Docente investigador, Universidad Nacional de Barranca, Barranca, Perú, ecosalva@yahoo.es

Autor para correspondencia: Tomás Darío Marín-Velásquez,
tmarin@protonmail.com

Resumen

En la investigación en laboratorio se evaluó el uso de un material filtrante con base en endocarpio o cáscara de coco (*Cocos nucifera*) de forma granular para el tratamiento de aguas contaminadas con gasoil de petróleo. Se construyó un sistema de filtros con tubos PVC y se empacaron con el endocarpio, luego de que el mismo fuera triturado manualmente y tamizado a un diámetro de 2 mm. Se utilizaron cinco cantidades de material filtrante (75, 105, 135, 150 y 165 g) y tres concentraciones de gasoil en agua (5, 10 y 15 %). Las muestras de agua contaminada se dejaron fluir a través de los filtros de forma descendente por acción gravitacional y en cada filtrado se determinó la cantidad de aceites y grasas (AyG) a partir de normas internacionales. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante *ANOVA factorial* y test de mínima diferencia significativa de Fisher. Los análisis estadísticos demostraron que existe influencia significativa de los dos factores (% gasoil y cantidad de material filtrante) sobre la variable respuesta en estudio (AyG) con un nivel de confianza de 95 %. Se demostró que el endocarpio de coco con el tamaño de granos utilizado es efectivo para la remoción de hidrocarburos en el agua, al lograrse porcentajes de remoción de 85.10, 84.23 y 82.10 %. Se obtuvo que a mayor cantidad del material filtrante, mayor es el grado de remoción con resultados estadísticamente significativos.

Palabras clave: agua contaminada, hidrocarburos, tratamiento, filtración, *Cocos nucifera*.

Abstract

In the research, the use of a granular filtering material, based on an endocarp or coconut shell (*Cocos nucifera*), was evaluated for the treatment of water contaminated with diesel at the laboratory level. A filtersystem with PVC tubes was built and packed with the endocarp after being crushed to a diameter of 2 mm. Five quantities of filter material (75, 105, 135, 150 and 165 g) and three concentrations of diesel oil in water (5, 10 and 15 %) were used. The samples of contaminated water were allowed to flow through the filters in a descending manner by gravitational action and each filtrate was determined the amount of oils and fats (AyG), by international standards. The results were analyzed statistically by factorial ANOVA and Fisher's minimal significant difference test. The statistical analyzes showed that there is a significant influence of the two factors (% diesel and amount of filtering material) on the response variable under study (AyG) with a confidence level of 95 %. It was demonstrated that the coconut endocarp with the grain size used, is effective for the removal of hydrocarbons in the water, achieving removal percentages of 85.10, 84.23 and 82.10 %. It was obtained that the greater the amount of filtering material, the greater the degree of removal with statistically significant results.

Keywords: contaminated water, hydrocarbons, treatment, filtration, *Cocos nucifera*.

Recibido: 09/04/2019

Aceptado: 18/04/2020

Introducción

Los productos derivados del petróleo se presentan como mezclas complejas de productos químicos, principalmente hidrocarburos. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos compuestos de átomos de carbono e hidrógeno dispuestos en diferentes configuraciones estructurales (WHO, 2008). La industria del petróleo se considera en la actualidad como una de las más importantes debido a que produce la principal fuente de energía empleada para el transporte y la industria, sin embargo la misma ha causado daños ambientales de gran magnitud por el potencial contaminante de los hidrocarburos del petróleo, los cuales se consideran contaminantes persistentes por su resistencia a la

biodegradación, su acumulación en el ambiente y los efectos nocivos que producen en la salud (Kumar *et al.*, 2014). Dada su condición hidrofóbica, los hidrocarburos, al mezclarse con el agua, generan una serie de procesos que afectan la vida tanto animal como vegetal, e impactan de forma negativa en los ecosistemas.

La presencia de hidrocarburos en aguas residuales que son vertidas a cuerpos de agua o al suelo causa graves daños ambientales y problemas a la salud de los seres vivos, incluyendo a los humanos. Los derivados de hidrocarburos, como gasolina, kerosene, gasoil, aceites lubricantes y asfalto, entre otros, generan contaminación del agua al ser vertidos en ella (Ismail *et al.*, 2020). Dicha contaminación afecta las condiciones fisicoquímicas de agua al producir una disminución de oxígeno disuelto por reducción del intercambio de oxígeno entre la fase atmósfera-agua; asimismo, impide la entrada de luz al medio, lo que inhibe el crecimiento de ciertas especies y disminuye la fijación de nutrientes (Velásquez, 2017).

Para el tratamiento de aguas aceitosas se han utilizado tradicionalmente filtros granulares con materiales filtrantes provenientes de plantas por su capacidad para adsorber o retener los hidrocarburos. Los medios filtrantes más comunes empleados en la industria petrolera y en el tratamiento de aguas residuales aceitosas están elaborados con base en cáscara de nuez negra (*Juglans regia*); sin embargo, en los últimos años se han desarrollado investigaciones de nuevos materiales

filtrante para tratamiento de aguas contaminadas, como fibra de coco (Fernández & Sánchez, 2016); tusa o elote de maíz (Marín & Villarroel, 2016); cascarilla de arroz (Higuera, 2017); conchas marinas (Galindo, Toncel, & Rincón, 2017); cáscaras de semilla de *Ricinus communis* (Marín-Velásquez, Heredia-Jiménez, & Alcarraz-Curi, 2019), y cascarilla de arroz modificada (Madu, Adams, Agboola, Ikotun, & Joseph, 2020), entre otros.

La cáscara o endocarpio de coco es un material de biomasa lignocelulósica, que contiene sustancias biodegradables y no tóxicas, como glucano, xilano, klason-lignina y cenizas (Li *et al.*, 2017a) Además, la cáscara de coco es muy hidrófila, propiedad que le confiere su grupos funcionales o químicos, como el acetamida, amino, amida, sulfhidrilo, sulfato, carboxilo e hidroxilo (Sousa *et al.*, 2014). Según Pérez (2019), la producción de coco en el mundo en el año 2018 fue de 56 211 700 de toneladas, siendo los principales productores Indonesia, Filipinas e India; en América, el país con la mayor producción fue Brasil. Para ese mismo año, Bianchini (2019) menciona que la producción de nuez, con cuya cáscara se elaboran los filtros comerciales para tratamiento de aguas aceitosas, fue de 2 027 423 de toneladas. Lo anterior indica que en el orbe existe una mayor producción de coco, por lo que la materia prima para la producción de filtros con la cáscara del mismo es abundante y se convierte en una potencial alternativa para sustituir a la cáscara de nuez.

La parte más usada del fruto del coco es (además de sus elementos comestibles) la fibra o mesocarpio, lo que deja al endocarpio como

material de desecho que se aprovecha en menor escala para elaborar adornos y para la producción de carbón activado; así, su uso potencial como material filtrante en el tratamiento de aguas aceitosas representa una importante contribución como alternativa sustentable en los países donde se cultiva la palmera de coco. Convertirla en material utilizado para tratar aguas aceitosas no sólo podría reducir la presión sobre el medio ambiente, sino que también crearía una alternativa única para hacer frente al deterioro de la calidad del agua.

La presente investigación presenta los resultados de la evaluación de la capacidad de retención de la cáscara o endocarpio de coco (*Cocos nucifera*) como medio filtrante para el tratamiento de agua contaminada con gasoil. Se escogió este material por ser de desecho abundante, no es tóxico, es verde, es de bajo costo y renovable. De igual forma, este material, por ser hidrófilo, posee excelentes propiedades de absorción (Bhaskar & Singh, 2013).

Materiales y métodos

Caracterización del agua

La muestra de agua utilizada se obtuvo directamente del suministro de agua potable y se caracterizó para corroborar que cumpliera con las propiedades indicadas en el *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Perú* (Ministerio de Salud del Perú, 2011) para asegurar que cualquier alteración posterior de las características de la misma fuera producto de la contaminación inducida. Las propiedades determinadas fueron el potencial de hidrógeno (pH), mediante el método potenciométrico (ASTM D1293, 2018); los sólidos suspendidos totales (SST), según la norma ASTM D5907 (2010); el contenido de aceites y grasas (AyG), por el procedimiento descrito en la norma EPA Method 1664 A (2000), y conductividad eléctrica por el método conductimétrico (ASTM D1125, 2014). Los límites de las propiedades para el agua potable se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua estudiados.

Parámetro	Unidad	Límite máximo
pH	Valor de pH	6.5 a 8.5
Conductividad eléctrica	$\mu\text{mho/cm}$	1 500

Sólidos	mg/l	1 000
Aceites y grasas	mg/l	0.5

Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos del Anexo II de la norma DS N° 031-2010-SA (Ministerio de Salud de Perú, 2011).

Contaminación del agua

El agua se contaminó con tres concentraciones de gasoil (5, 10 y 15 %) por mezclado con agitación mecánica, las cuales se fijaron de acuerdo con las concentraciones utilizadas por Marín y Villarroel (2016), y Marín-Velásquez *et al.* (2019); se dejaron en reposo y luego se separaron los hidrocarburos sobrenadantes utilizando embudos de separación. Las muestras de agua contaminadas se caracterizaron de nuevo para obtener los mismos parámetros que se determinaron para el agua sin contaminar, a fin de comparar los valores y establecer el efecto de los hidrocarburos sobre las propiedades del agua, así como la cantidad de éstos que se disuelven o dispersan en el vital líquido.

Preparación del material filtrante

Para la preparación del material filtrante se obtuvieron las cáscaras o endocarpios de coco, las cuales se procesaron para eliminar los restos de fibra (mesocarpio); luego se trituraron en molino de martillo, y se tamizaron con malla de 2 mm para asegurar un tamaño uniforme de granos. Se sometió el material filtrante a lavado con agua mediante el método de extracción sólido-líquido (Soxhlet) y se secaron por 24 horas en estufa a 105 °C. Luego de la preparación, el material filtrante se caracterizó para determinar las siguientes propiedades: densidad a través del método descrito en la norma ASTM D854 (2014); pH por el método establecido en la norma ASTM D4972 (2001), y adsorción de agua y porosidad por gravimetría (Bazán, 2017).

Construcción del filtro y desarrollo experimental

Se construyeron tres filtros con tubos de cloruro de polivinilo (PVC) de 5.1 cm de diámetro y 50 cm de longitud (Figura 1); en cada uno de ellos se colocaron tres etapas (o empaques) de medio filtrante con masas iguales retenidas por mallas metálicas y con un espaciado de cinco cm entre ellas; como cada filtro se elaboró con las mismas características, se obtuvieron tres réplicas del ensayo por cada cantidad de material filtrante (cada filtro representó una réplica).

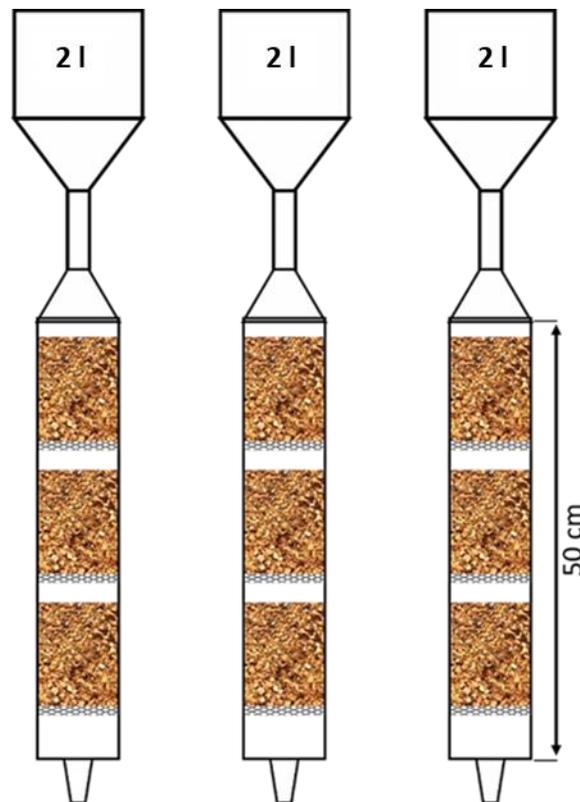


Figura 1. Representación de los filtros construidos. Fuente: elaboración propia.

Las cantidades de material filtrante utilizadas, definidas de acuerdo con el criterio de los investigadores y en función a la capacidad máxima de los filtros se muestran en la Tabla 2. El filtrado se realizó de manera descendente por efecto de la aceleración de gravedad y se usaron dos litros de agua en cada filtración.

Tabla 2. Cantidades de medio filtrante utilizadas.

Identificación	Cantidad de medio filtrante (g)
Filtro A	75
Filtro B	105
Filtro C	135
Filtro D	150
Filtro E	165

Fuente: elaboración propia.

Cada muestra de agua contaminada se filtró en cada filtro, lo que representó un diseño experimental factorial con tres muestras, cinco

tratamientos y tres réplicas (3 x 5 x 3). Por cada filtrado se determinó AyG, lo que representó un total de 90 ensayos realizados.

Para el cálculo de la eficiencia de remoción de aceites y grasas del medio filtrante se aplicó la Ecuación (1) (Marín-Velásquez *et al.*, 2019):

$$\% Ef = \frac{AyG_i - AyG_f}{AyG_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde % *Ef* es el porcentaje de eficiencia de remoción de aceites y grasas; los subíndices *i* y *f* representan los valores inicial y final, respectivamente.

Tratamiento estadístico

Se realizó un análisis ANOVA factorial con test de diferencia mínima significativa de Fisher, para establecer si los factores porcentaje de gasoil y cantidad de material filtrante ejercen influencia estadísticamente significativa sobre la variable dependiente AyG. El nivel de confianza

utilizado fue de 95 % ($\alpha = 0.05$). Se empleó el *software* estadístico *InfoStat* versión 2018.

Resultados

En la Tabla 3 se muestran las propiedades determinadas a la muestra de agua sin contaminar y contaminada con gasoil luego de la aplicación de las pruebas normalizadas de laboratorio.

Tabla 3. Propiedades del agua antes y después de contaminada con gasoil.

Propiedades	Gasoil (%)	Valor	CV (%)
pH	0	7.00	2.13
	5	6.88	
	10	6.75	
	15	6.67	

	0	10.26	
	5	10.22	
Conductividad ($\mu\text{mho/cm}$)	10	10.20	0.28
	15	10.20	
	0	78	
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	5	95	15.36
	10	100	
	15	114	
	0	0	
Aceites y grasas (mg/l)	5	255	66.72
	10	260	
	15	268	

Fuente: elaboración propia.

Se observa que las propiedades pH y conductividad no sufrieron cambios importantes con base en el coeficiente de variación (CV), el cual fue para estas dos propiedades menor a 5 %, sin embargo los SST y AyG aumentaron al contaminar el agua con gasoil, y el CV para ese aumento fue significativo, ya que su CV fue mayor de 5 %. Aun cuando no se le adicionaron sólidos al agua, la presencia de pequeñas gotas de hidrocarburos dispersos en ella, al ser contaminada, son contabilizados

por el método de prueba como SST, por lo que se observa aumento en esta propiedad, pero que está influenciada por los AyG, que son función de la cantidad de gasoil mezclado con el agua. El pH disminuye, aunque la variación fue baja ($CV = 2.13 \%$), con valores que se mantuvieron relativamente estables dentro del rango neutro, por lo que se puede decir que la presencia de gasoil no afectó esta propiedad. El gasoil, como todo hidrocarburo, es poco conductivo, por lo que se observa una disminución en la conductividad medida, aun cuando no fue una disminución considerable ($CV = 0.28 \%$), por lo que se puede decir que la presencia del gasoil no influye en esta propiedad del agua.

En la Tabla 4 se muestran las propiedades del medio filtrante elaborado con endocarpio de coco (*Cocos nucifera*), luego de aplicar los procedimientos de las normas mencionadas en la metodología.

Tabla 4. Propiedades del medio filtrante.

Propiedades	Valor
Densidad (g/ml)	0.51
pH	5.13
Adsorción de agua (%)	35.80
Porosidad (%)	55.02

Fuente: elaboración propia.

Se observa que el medio filtrante tiene una densidad menor a la unidad, por lo que se puede considerar baja. El pH se ubica dentro del rango entre fuerte y mediano (5.0 y 5.5) de acuerdo con la escala mostrada por Bazán (2017). La adsorción de agua indica que puede retener el 35.80 % de agua dentro de su estructura, lo que es acorde con su porosidad, que se puede considerar como un medio con porosidad alta.

En la Tabla 5 se muestran los resultados promedios obtenidos luego de filtrar las muestras de agua contaminadas a través de las diferentes cantidades de medio filtrante.

Tabla 5. Resultados del filtrado de las aguas contaminadas con gasoil.

Identificación	Cáscara (g)	% gasoil	AyG (mg/l)	% Ef
Filtro A	75	5	76	70.20
		10	80	69.23
		15	84	68.66
Filtro B	105	5	62	75.69
		10	66	74.62
		15	71	73.51

		5	51	80.00
Filtro C	135	10	54	79.23
		15	57	78.73
		5	44	82.75
Filtro D	150	10	48	81.54
		15	51	80.97
		5	38	85.10
Filtro E	165	10	41	84.23
		15	44	83.58

Fuente: elaboración propia.

Se observa que los valores de AyG disminuyen al aumentar la cantidad de medio filtrante, obteniéndose resultados menores a los determinados en las muestras de agua contaminadas (Tabla 3), indicativo de que el medio filtrante está reteniendo los aceites y grasas contenidos en el agua. Los resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 2, donde se observa que independientemente del porcentaje de gasoil en el agua contaminada, la tendencia es lineal, siendo el coeficiente de correlación promedio de Pearson de -0.98, lo que representa una correlación muy fuerte entre las variables cantidad de material filtrante y AyG, con un p -valor = 0.001; ello demuestra que la relación lineal es

estadísticamente significativa. La eficiencia de remoción calculada para cada uno de los filtros indica que la misma aumenta con la cantidad de medio filtrante y disminuye con la cantidad de gasoil utilizado para contaminar el agua, alcanzando un máximo de eficiencia en el Filtro E (165 g) con 85.10 % en la muestra contaminada con 5 % de gasoil.

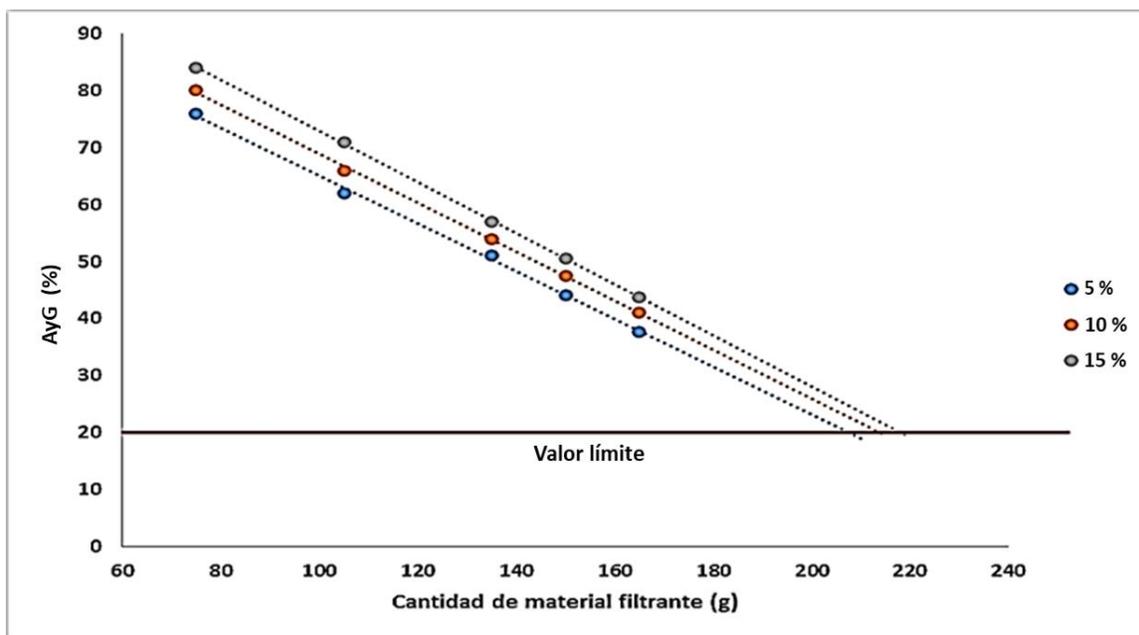


Figura 2. Representación gráfica de la tendencia de los valores de AyG en función de la cantidad de material filtrante. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la cantidad de material filtrante requerido para lograr que el agua filtrada alcance el valor límite establecido en la norma DS N° 031-2010-SA para aguas contaminadas tratadas para ser vertidas en cuerpos de agua (20 mg/l) es de unos 220 g.

El análisis ANOVA multifactorial para las variables dependientes pH y AyG y factores cantidad de medio filtrante y % gasoil se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del ANOVA multifactorial.

Variable	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
AyG	Cantidad de medio filtrante	2 895.07	4	723.77	1 550.93	< 0.0001
	% gasoil	129.60	2	64.80	138.86	< 0.0001
	Error	3.73	8	0.47		
	Total	3028.40	14			

Fuente: elaboración propia a partir de resultados obtenidos del software *InfoStat*.

Se observa que los dos factores tienen influencia estadísticamente significativa sobre la variable dependiente, con un nivel de confianza de 95 % (p -valor < 0.05). Se corrobora que los contenidos de AyG en el

agua luego del proceso de filtrado están influenciados por la cantidad de hidrocarburos presentes en el agua contaminada antes del proceso y de la cantidad utilizada de endocarpio de *Cocos nucifera*.

En la Figura 3 se muestra una representación de los resultados del análisis de diferencia mínima significativa de Fisher para la variable AyG respecto a los factores estudiados.

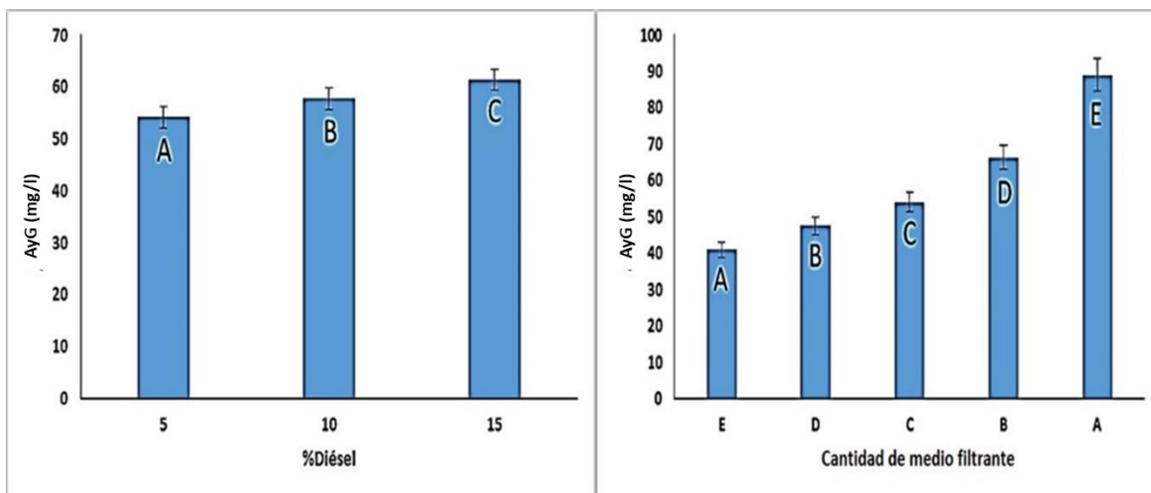


Figura 3. Representación gráfica del análisis de diferencia mínima significativa de Fisher para la variable AyG (mg/l). Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos del software *InfoStat*.

En la Figura 3 se observa que para ambos factores existen diferencias estadísticamente significativas en los resultados de la variable

AyG, las más evidentes son las diferencias respecto al factor cantidad de medio filtrante en comparación con el factor % gasoil.

Discusión

El agua utilizada en la investigación cumple con las propiedades para clasificarse como agua potable (Tabla 3), según los límites establecidos en la norma peruana DS N° 031-2010-SA (Ministerio de Salud, 2011). Como lo indica la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) en su *Guía para la calidad del agua potable de 2006*, el agua potable es esencial para la vida y es adecuada para todos los usos domésticos, donde se incluye la higiene personal, por lo que se puede decir que la muestra de agua original tiene las características adecuadas para su consumo. Al ser contaminada con gasoil, los valores de pH, conductividad y SST se mantienen entre los rangos establecidos por la norma (Tabla 1); sólo los valores de AyG excedieron los rangos establecidos para el agua potable. Los valores también se compararon con los reportados en la norma peruana para el vertido de aguas residuales Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (2010), donde se observa que incluso contaminada, el pH

(6.5-8.5) y los SST (150 mg/l) del agua se mantiene dentro de los límites para ser vertida a cuerpos de agua superficiales, siendo AyG los únicos superiores al límite máximo de 20 mg/l, lo que confirma la necesidad de tratamiento para disminuir la cantidad de este parámetro y así el agua pueda quedar en condiciones de ser vertida o dispuesta.

En cuanto a las propiedades del material filtrante (Tabla 4), al compararlas con otros materiales, como el carbón activado, cuya densidad se encuentra entre 1.18 y 1.35 g/ml (Navarro & Vargas, 2010), se observó que es menos denso y, por lo tanto, tiende a flotar en el agua o formar una suspensión si se utiliza un tamaño de partículas muy pequeño. Por lo anterior, se decidió utilizar un diámetro homogéneo de partículas de 2 mm para evitar la formación de suspensiones que pudieran influir de manera negativa en los resultados. Otro material filtrante muy usado en el tratamiento de agua aceitosas es la cáscara de nuez negra, la cual tiene una densidad entre 0.3 y 0.5 g/ml (Anaproc, 2015); se obtuvo que el valor coincide con este rango de densidad, por lo que podría sustituir a la cáscara de nuez en filtros industriales sin crear exceso de peso. Otro medio filtrante usado con base en material vegetal es la cáscara de arroz, la cual reportó un valor de densidad de 0.14 g/ml (Pozzolo *et al.*, 2014), el cual es menor al obtenido. La densidad del endocarpio de coco registrada fue menor a la reportada por Bello, Agunsoye, Adebisi, Kolawole y Hassan (2016) de 0.61 g/ml; sin embargo, los autores citados concluyen que dependiendo del tamaño de partícula, la densidad varió entre 0.34 y 0.65 g/ml, por lo que el valor obtenido se

encuentra dentro del rango. Este parámetro también fue mayor a los conseguidos para la cascarilla de *Ricinus communis* (0.16 g/ml) y el carbón vegetal (0.35 g/ml), que fueron usados como medios filtrantes para aguas aceitosas por Marín-Velásquez *et al.* (2019).

En relación con las propiedades de adsorción de agua y porosidad, los valores obtenidos fueron mayores a los de otro material filtrante granular, la zeolita, cuya retención de agua es de 31.4 % y porosidad de 35 % (Carbotecnia, 2018). De igual forma, la absorción de agua fue mayor a la reportada por Gunasekaran, Kumar y Lakshmipathy (2011) para el endocarpio de coco, cuyo resultado fue de 24 %. Otro trabajo investigado reportó adsorción de agua por endocarpio de coco de 35 % (Bhaskar & Singh, 2013), que coincide con el obtenido en la presente investigación. Lo anterior demuestra que se trabajó con material filtrante con adsorción de agua mayor a las reportadas por otras investigaciones, lo cual es indicativo de su capacidad de retención de partículas suspendidas en el agua. La porosidad obtenida puede clasificarse como alta, pues se considera que la máxima porosidad en granos esféricos con arreglo cúbico es de 47.6 % (Amyx, Bass, & Whiting, 1960; Dugan, 2015).

Los valores de AyG disminuyen respecto a la cantidad de material filtrante utilizado, mostrando una tendencia significativa (p -valor < 0.05) y lineal inversa con R de Pearson de -0.98 (Figura 2). De acuerdo con lo anterior, aunque con la cantidad máxima de material filtrante utilizada (165 g) no se logró llevar los valores de AyG al límite establecido en la

norma para el vertido de agua tratada a cuerpos de agua de 20 mg/l según el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (2010), las tendencias observadas indican que con una cantidad de 220 g se puede alcanzar ese valor para las tres concentraciones de gasoil utilizadas en contaminar el agua. Una investigación anterior concluyó que el endocarpio o cáscara de coco no fue eficiente para filtrar agua contaminada con hidrocarburos (Ogbonna, 2016); sin embargo, existe una diferencia sustancial entre las dos investigaciones, que es el tamaño de las partículas de material filtrante. En la presente investigación se utilizó un diámetro menor, por lo que se tuvo mayor área de contacto y, por ende, mayor eficiencia de adsorción. Otra diferencia fundamental que favorece al resultado obtenido es que en la investigación citada se filtró en una sola etapa y no en tres, como se realizó en la presente investigación.

Otros medios filtrantes han sido utilizados para remoción de aceites y grasas de aguas contaminadas, como el caso de la tusa de maíz (Marín & Villarroel, 2016), que alcanza eficiencias de remoción mayores a 99 %, lo que supera al valor máximo obtenido de 85.10 %; sin embargo, en la investigación citada se menciona como limitante en el uso del medio filtrante de tusa de maíz, que no es reutilizable por su característica de harina, limitante que no se observa con el endocarpio de *Cocos nucifera*, pues se puede regenerar y reutilizar por sus características de dureza (Gunasekaran *et al.*, 2011). Salazar (2012) determinó la capacidad de plumas de pollo para adsorber gasolina contenida en agua, alcanzando un máximo de 45 % de eficiencia; esto indica que el medio filtrante

propuesto es más eficiente que el utilizado por el autor citado. La arcilla de caolín como medio filtrante para remoción de hidrocarburos en agua fue estudiada por Antwi-Akomeah, Fei-Baffoe, Belford y Borigu (2018), alcanzando una eficiencia de 90.72 %, valor que aunque fue mayor, no se encuentra tan distante del obtenido. Por otro lado, la eficiencia máxima lograda fue menor a la calculada por Marín *et al.* (2019) con una combinación de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal con un máximo de 88.2 %. En comparación con la eficiencia de la cáscara de nuez negra, se observó que la eficiencia obtenida fue mayor a la reportada por Srinivasan y Viraraghavan (2008), que fue de 64 % al tratar agua contaminada con gasoil. Por otro lado, Li *et al.* (2017b) obtuvieron un porcentaje máximo de remoción de aceite en aguas filtradas con cáscara de nuez de 92 %, que aunque es mayor a la eficiencia máxima obtenida, los autores citados utilizaron un material filtrante comercial procesado y aceite diferente al de la presente investigación. En relación con el carbón activado, Waisi, Arena, Benes, Nijmeijer y McCutcheon (2019) reportaron una eficiencia máxima de 95 % de remoción de petróleo en agua, por lo que este material filtrante también muestra mayor eficiencia que la cáscara de coco, sin embargo se debe tomar en cuenta que se trata de un producto comercial procesado, al igual que la cáscara de nuez, y el material utilizado en la presente investigación fue más natural. Lo anterior demuestra que el medio filtrante propuesto puede sustituir a medios filtrantes comerciales.

El análisis estadístico demostró que los factores estudiados (% gasoil y cantidad de medio filtrante) influyeron de forma estadísticamente significativa respecto a los valores de AyG obtenidos. Se observaron diferencias significativas para todos los valores de % gasoil y todas cantidades de medio filtrante (Figura 3). Lo anterior demuestra la aplicabilidad del endocarpio o cáscara de coco como material filtrante para el tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos y puede ser un potencial sustituto de otros materiales usados comúnmente a nivel industrial, como el caso de la cascarilla de nuez o el carbón activado. Los medios filtrantes vegetales son utilizados para el tratamiento de aguas de producción petrolera, sobre todo los de cáscaras de nuez negra, por lo que la investigación realizada puede tomarse como referencia para estudiar a más profundidad el uso del material propuesto.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la investigación demuestran la aplicabilidad del endocarpio o cáscara de coco (*Cocos nucifera*) como medio filtrante granular para la remoción de aceites y grasas presentes en aguas

contaminadas con hidrocarburos; bajo las condiciones de la investigación se alcanzó una eficiencia de remoción superior a las de otros medios filtrantes que han sido estudiados con el mismo fin.

Aunque no se logró el valor límite establecido en la norma DS N° 031-2010-SA, para considerar al agua apta para ser vertida en cuerpos de agua, la tendencia lineal inversa mostrada al correlacionar las variables ($R = -0.98$; $p = 0.001$) permite concluir que se puede llegar a tener el agua filtrada dentro del límite permitido si se aumenta la cantidad de medio filtrante.

Los análisis estadísticos ANOVA factorial y mínima diferencia significativa de Fisher demostraron que existe relación significativa entre los valores obtenidos para el contenido de AyG y los factores estudiados porcentaje de gasoil en el agua y cantidad de material filtrante, al utilizar una significancia con $\alpha = 0.05$, lo que representa un 95 % de confianza. Lo anterior indica que la eficiencia de remoción de la cáscara de coco varía respecto a la masa que se utilice de la misma y de la cantidad de aceite que se encuentre en el agua. A mayor cantidad de medio filtrante y menor cantidad de aceite contaminando el agua, mayor será la eficiencia.

Aun cuando las condiciones de experimentación no son las mismas, el medio filtrante propuesto mostró similar o mejor desempeño que otros materiales vegetales utilizados en investigaciones previas en cuanto a la eficiencia de remoción, sobre todo cuando se le comparó con medios filtrantes comerciales, como la cáscara de nuez y el carbón activado; esto

lo coloca como posible sustituto de materiales usados en la industria para la remoción de hidrocarburos en el agua.

Referencias

- Amyx, J. W., Bass, J. D. M., & Whiting, R. L. (1960). *Petroleum reservoir engineering*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Anaproc. (2015). *Ficha técnica. Harina de cáscara de nuez*. Recuperado de <http://www.anaproc.cl/>
- 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. DOI: <http://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.003>
- ASTM D854. (2014). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. West Conshohocken, USA: ASTM International. DOI: <https://doi.org/10.1520/d0854>
- ASTM D1125. (2014). *Standard test methods for electrical conductivity and resistivity of water*. West Conshohocken, USA: ASTM International. DOI: <https://doi.org/10.1520/d1125>

- ASTM D1293. (2018). *Standard test methods for pH of water*. West Conshohocken, USA: ASTM International. DOI: <https://doi.org/10.1520/d1293-18>
- ASTM D4972. (2001). *Standard test method for pH of soils*. West Conshohocken, USA: ASTM International. DOI: <https://doi.org/10.1520/d4972-01>
- ASTM D5907. (2010). *Standard test methods for filterable matter (total dissolved solids) and non-filterable matter (total suspended solids) in water*. West Conshohocken, USA: ASTM International. DOI: <https://doi.org/10.1520/d5907-10>
- Bazán, B. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Bello, S. A., Agunsoye, J. O., Adebisi, J. A., Kolawole, F. O., & Hassan, S. B. (2016). Physical properties of coconut shell nanoparticles. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 12(1), 63-79. DOI: <https://doi.org/10.3126/kuset.v12i1.21566>
- Bhaskar, J., & Singh, V. K. (2013). Water absorption and compressive properties of coconut shell particle reinforced-epoxy composite. *Journal of Materials and Environmental Science*, 4(1), 113-118.

Bianchini, R. (2019). *Oferta y demanda de nueces en el mundo ¿Camino a una sobreproducción?* Recuperado de http://chilenut.cl/clausura2019/assets/rafael_bianchini_congreso2019pdf

Carbotecnia. (2018). Zeolita natural. En: *Medios Granulares*. Recuperado de <https://www.carbotecnia.info/PDF/medfiltrantes/Zeolita.pdf>

Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. (2010). *Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.

Dugan, B. (2015). Data report: Porosity and pore size characteristics of sediments from Site C0002 of the Nankai trough determined by mercury injection. In: Strasser, M., Dugan, B., Kanagawa, K., Moore, G. F., Toczko, S., Maeda, L., & the Expedition 338 Scientists (eds.). *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program* (vol. 338). Houston, USA: Yokohama. Integrated Ocean Drilling Program. DOI: <https://10.2204/iodp.proc.338.202.2015>

EPA Method 1664 A. (2000). *N-hexane extractable material (HEM; oil and grease) and silica gel treated n-hexane extractable material (SGT-HEM; non-polar material) by extraction and gravimetry, analytical method guidance for EPA Method 1664A Implementation and Use (40 CFR part 136)*. Washington, DC, USA: United States Environmental Protection Agency.

- Fernández, E. J., & Sánchez, K. L. (2016). *Evaluación de un lecho filtrante, utilizando mesocarpo de coco (Cocos nucifera), para el tratamiento de aguas residuales de la empacadora de banano algarrobo 1, Sullana 2015* (tesis de pregrado). Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú.
- Galindo, A., Toncel, E., & Rincón, N. (2017). Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte. *Revista Ion, Investigación, Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*, 29(2), 37-48. DOI: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016003>
- Gunasekaran, K., Kumar, P. S., & Lakshmiathy, M. (2011). Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), 92-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.053>
- Higuera, S.K. (2017). Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC-Yopal, Casanare, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 107-118. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.1842>
- Ismail, N. H., Salleh, W. N. W., Ismail, A. F., Hasbullah, H., Yusof, N., Aziz, F., & Jaafar, J. (2020). Hydrophilic polymer-based membrane for oily wastewater treatment: A review. *Separation and Purification*

Technology, 233, 116007-116025. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116007>

Kumar, A. G., Vijayakumar, L., Joshi, G., Peter, D. M., Dharani, G., & Kirubakaran, R. (2014). Biodegradation of complex hydrocarbons in spent engine oil by novel bacterial consortium isolated from deep sea sediment. *Bioresource Technology*, 170, 556-564. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.008>

Li, J., Xu, C., Zhang, Y., Tang, X., Qi, W., & Wang, Q. (2017a). Gravity-directed separation of both immiscible and emulsified oil/water mixtures utilizing coconut shell layer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 511, 233-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.09.111>

Li, J., Zhao, Z., Li, D., Tang, X., Feng, H., Qi, W., & Wang, Q. (2017b). Multifunctional walnut shell layer used for oil/water mixtures separation and dyes adsorption. *Applied Surface Science*, 419, 869-874. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.114>

Madu, J. O., Adams, F. V., Agboola, B. O., Ikotun, B. D., & Joseph, I. V. (2020). *Purifications of petroleum products contaminated water using modified rice husk ash filters*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.466>

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. *Revista Geominas*, 44(70), 91-96.

Marín-Velásquez, T. D., Heredia-Jiménez, V. I., & Alcarraz-Curi, M. (2019). Filtro de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: diseño de un sistema en serie por etapas. *Ingeniería del Agua*, 23(3), 187-198. DOI: <https://doi.org/10.4995/Ia.2019.11426>

Ministerio de Salud de Perú (2011). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano. DS N° 031-2010-SA*. Recuperado de: http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/reglamento_calidad_agua.pdf

Navarro, P., & Vargas, C. (2010). Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. *Revista de Metalurgia*, 46(3), 227-239. DOI: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0929>

Ogbonna, O. C. (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.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es/

- Pérez, A. (2019). *Ranking de los principales países productores de coco a nivel mundial en 2018*. Recuperado de <https://es.statista.com/estadisticas/613440/principales-paises-productores-de-coco-en-el-mundo/>
- Pozzolo, O., Hidalgo, R., Meichtry, M., Domínguez, F., Gromenida, N., & Gallo, I. (2014). Estudio de la relación cáscara-grano en el cultivo de arroz en implicancias con el silo bolsa. *1er Congreso Internacional de Almacenamiento de Granos en Silo Bolsa '14*. Recuperado de https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-estudio_de_la_relacin_cscara_grano_en_el_cultivo.pdf
- Salazar, I. A. E. (2012). *Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- Sousa, V. O., Quadros, D., Cardoso, T., Nonato, R., Teixeira, P., Araújo, M. A., & Ferreira, R. (2014). Evaluation of new chemically modified coconut shell adsorbents with tannic acid for Cu (II) removal from wastewater. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(18), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.40744>
- Srinivasan, A., & Viraraghavan, T. (2008). Removal of oil by walnut shell media. *Bioresource Technology*, 99, 8217-8220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.072>
- Velásquez, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como

estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>

Waisi, B. I., Arena, J. T., Benes, N. E., Nijmeijer, A., & McCutcheon, J. R. (2019). Activated carbon nanofiber nonwoven for removal of emulsified oil from water. *Microporous and Mesoporous Materials*, 296, 109966-110004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109966>

WHO, World Health Organization. (2008). *Petroleum products in drinking-water who guidelines for drinking-water quality*. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/petroleumproducts_1add_june2008.pdf