



Eficacia del carbón activado de leña de *Vitis vinifera* en el tratamiento de agua residual doméstica de Cachiche, Ica

Efficacy of Vitis vinifera wood activated carbon in the treatment of domestic wastewater in Cachiche, Ica

^{1,a,*}Carlos Jefferson Ocaña Castillo

^{1,b}Smith, Quispe Huamanca

^{1,c}Yimi Tom Lozano Sulca

ARTÍCULO ORIGINAL

¹ Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

Correspondencia:

*cocanaca@ucvvirtual.edu.pe

^aORCID: 0000-0002-4657-1728

^bORCID: 0000-0003-3474-5601

^cORCID: 0000-0002-0803-1261

Palabras clave: *Vitis vinifera*, capacidad de adsorción, tratamiento, microbiológicos, *E. coli*.

Keywords: *Vitis vinifera*, adsorption capacity, treatment, microbiological, *E. coli*.

Información adicional

Presentado: 16/09/2023

Aprobado: 2/11/2023

RESUMEN

El propósito del estudio fue evaluar la eficacia del carbón activado (CA) de leña de *Vitis vinifera* en el tratamiento de aguas residuales doméstica de Cachiche, Ica, evaluando el tiempo de contacto y la regeneración de CA en el porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción de DQO, DBO₅, coliformes totales, coliformes termotolerantes y *E. Coli*; para ello se aplicó el diseño experimental factorial. A 90 minutos de tiempo de contacto y CA sin regeneración revelaron mayores porcentajes de remoción y capacidad de adsorción de DBO₅: 39,77 %, 9,86 mg/g; coliformes totales: 58,50 %, 5,13×10⁷ NMP/g; coliformes termotolerantes: 45,5 %, 2,00×10⁷ NMP/g y *E. coli*: 71,5 %, 9,84×10⁶ NMP/g; mientras que los mayores valores para DQO fueron 37,86 % y 17,5 mg/g, obtenidos con CA regenerada una vez y a 90 minutos. El efecto del tiempo de contacto fue significativo ($p < 0,05$) en la capacidad adsorción de coliformes totales, pero para el resto de los parámetros no fue significativo; por otro lado, la regeneración del CA tuvo efecto significativo en la capacidad de adsorción de DBO₅, DQO, coliformes termotolerantes, coliformes totales y *E. Coli*. En conclusión, el CA de leña de *Vitis vinifera* es un adsorbente eficaz y prometedor para mejorar la calidad del agua.

ABSTRACT

The purpose of the study was to evaluate the effectiveness of activated carbon (AC) from *Vitis vinifera* firewood in the treatment of domestic wastewater from Cachiche, Ica, evaluating the contact time and the regeneration of AC in the removal percentage and the capacity of adsorption of COD, BOD, total coliforms, thermotolerant coliforms and *E. Coli*; for this, the factorial experimental design was applied. At 90 minutes of contact time and AC without regeneration revealed higher removal percentages and adsorption capacity of BOD₅: 39.77 %, 9.86 mg/g; total coliforms: 58.50 %, 5.13×10⁷ NMP/g; thermotolerant coliforms: 45.5 %, 2.00×10⁷ MPN/g and *E. coli*: 71.5 %, 9.84×10⁶ MPN/g; while the highest values for COD were 37.86 % and 17.5 mg/g, obtained with CA regenerated once and at 90 minutes. The effect of contact time was significant ($p < 0,05$) in the adsorption capacity of total coliforms, but for the rest of the parameters it was not significant; on the other hand, the regeneration of the AC had a significant effect on the adsorption capacity of BOD₅, COD, thermotolerant coliforms, total coliforms, and *E. Coli*. In conclusion, AC from *Vitis vinifera* firewood is an effective and promising adsorbent to improve water quality.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial al año, se generan 380 mil millones de litros de aguas residuales doméstica (ARD) y se espera que aumente un 24 % para 2030 y 51 % para 2050; mientras que más del 80 % de estas aguas residuales se vierte al entorno sin un tratamiento adecuado, y varía según las regiones (Environment and Natural Resources Department, 2022). Las aguas residuales domésticas provienen del lavado de utensilios y ropa, el uso de baños, la limpieza de las manos, el hogar, los vehículos, entre otros. Las aguas residuales derivadas de estas acciones pueden ser subdivididas en varias categorías: amarilla (compuesto por orina), marrón (combina heces con agua corriente), negro (orina, heces y actividad microbiana), y gris (incluyen agua de la cocina, la lavandería, la ducha y el lavado de manos) (Koul et al., 2022). Además, estas aguas residuales contienen compuestos orgánicos (como proteína, almidón, grasa y urea), microorganismos patógenos y materia en suspensión (De Gisi et al., 2017). Dada la naturaleza intrínseca de las aguas residuales, liberar sin un tratamiento adecuado puede causar graves problemas ambientales y de salud pública, ya que promueve el desarrollo de microorganismos patógenos en ríos y arroyos, lo que resulta en una degradación ambiental severa y riesgos para la salud, especialmente en países en desarrollo. Por lo tanto, es crucial aplicar un tratamiento adecuado para eliminar los contaminantes de las ARD (Balogun y Ogwueleka, 2021).

Se realizaron diversos esfuerzos para mitigar la descarga de agua contaminada mediante diversas técnicas, tales como: ósmosis inversa, oxidación química, filtración por membrana, coagulación y floculación, lodos activados, ozonización, precipitación, electrodiálisis, intercambio iónico y técnicas electroquímicas, además de ser métodos costosos, generan un exceso de lodos (Murcia-Salvador et al., 2020). Sobresaliendo la adsorción como un método más práctico que se considera eficiente en comparación con los mencionados anteriormente, que demostró una adsorción efectiva, por ejemplo, de metales pesados (Mayta-Armas et al., 2023), y la interacción de microorganismos con adsorbentes a base de carbono (Bwatanglang et al., 2023). El proceso de adsorción es muy eficaz para eliminar los contaminantes de las aguas residuales (AR), lo que permite grandes reducciones en el volumen de efluentes no tratados. Como señalan Jagadeesh y Sundaram (2023), el tratamiento de AR se ha basado en gran medida sobre el carbón activado comercial durante décadas. Sin duda, hay muchos beneficios para la adsorción en CA debido a la capacidad de eliminar una variedad de contaminantes; sin embargo, su alto precio sigue siendo una desventaja importante, en ese sentido el CA elaborado a partir de una variedad de biomásas podría proporcionar enfoques alternativos. De hecho, varios esfuerzos de investigación se centran en generar materiales rentables como el biocarbón a partir de varios subproductos agrícolas (Li et al., 2019), despertando el interés por el tratamiento de AR domésticas mediante biosorción. Existen tratamientos de efluentes de AR con el CA en forma de polvo o gránulos, siendo de interés la investigación sobre la síntesis y aplicación de CA derivado de una extensa gama de subproductos agrarios (Sashikesh et al., 2023). Además de ello, la regeneración es un aspecto crucial que define la reutilización y la eficiencia de los adsorbentes para su uso repetido, contribuyendo además a la viabilidad financiera y la eficacia del proceso de adsorción (Gkika et al., 2022).

El estudio realizado por Sia et al. (2016), con CA a base de cáscara de coco, logró porcentajes de eliminación de color, sólidos suspendidos totales (SST), y demanda química de oxígeno (DQO) del 61 %, 39 % y 66 % respectivamente, del efluente de plantas de aceite de palma. Asimismo, Azmi et al. (2015), con CA derivado del bagazo de caña de azúcar logró remover el color (87,3 %) y DQO (77,8 %); esto demuestra la capacidad de adsorción del CA para los contaminantes del AR. Además, de la eliminación de bacterias como *E. coli* (Pal, Joardar, y Myong, 2006).

En Perú al igual que en otros países en desarrollo, con el crecimiento poblacional se requiere más plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), por lo que es necesario una mayor implementación de estas. Según las empresas proveedoras, a octubre de 2021 se han alcanzado un total de 202 PTAR, de las cuales 171 (85 %) se encuentran operativas, 4 (2 %) en construcción y 27 (13 %) inactivas por mala planificación o construcción, esto ha propiciado la descarga de un aproximado de $61,2 \times 10^6$ de m^3 de aguas residuales sin tratamiento en el 2020 (Zela y Olivas, 2022).

En la ciudad de Cachiche, Ica, se aprecia gran cantidad de ARD no tratada que presenta contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos, a causa de que el sistema de tratamiento de AR opera deficientemente, la falta de conciencia ambiental de los dirigentes y población en general; el cual conlleva a la propagación de enfermedades infecciosas, afectan la flora y fauna, y la calidad de vida de los residentes de la zona. Es importante abordar este desafío, considerando tecnologías para solucionar esta problemática dando un valor agregado a recursos de la biomasa; por ende, la finalidad de este trabajo fue evaluar la eficacia de CA de leña de vid (*Vitis vinifera*) en el tratamiento de aguas residuales doméstica de Cachiche, Ica, evaluando el tiempo de contacto y la regeneración de carbón activado en el porcentaje de remoción y la capacidad de adsorción de DQO, DBO5, coliformes totales, coliformes termotolerantes y *E. coli* del AR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del carbón activado

Se realizó el secado de 1 kg de leña de vid, proveniente del campo de vid de la ciudad de Ica, al aire libre por 30 días expuesto al sol. Luego se procedió con la carbonización de la leña de vid a 500 °C, durante 3 horas. Se dejó enfriar y se trituró logrando un carbón en polvo. Para la activación del carbón, se realizó una solución de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85 %; la impregnación se realizó a temperatura ambiente por 24 horas. Posteriormente se lavó con agua destilada por 3 veces para la eliminación de restos del ácido fosfórico y seguidamente la muestra fue colocada en la estufa a 90 °C por 1 h para remover la humedad del carbón activado. Finalmente, se puso en un desecador a temperatura ambiente.

Muestreo y análisis del agua

La toma de muestra del ARD se realizó al afluente de “laguna de oxidación Cachiche”. Se recolectaron 38 litros de ARD, en seguida se procedió a realizar la homogeneización y el transporte de inmediato. Los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fueron analizados en el laboratorio LABPERÚ E.I.R.L., para los análisis correspondientes de los parámetros. La temperatura, pH y conductividad eléctrica fueron analizados *in situ*.

Experimentos de remoción de los contaminantes con el carbón activado

Los experimentos de remoción de DQO, DBO5, coliformes totales, coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* del ARD se realizaron mediante agitación a 200 rpm, con dosis de 8 g/L de CA, controlando el tiempo de contacto y la regeneración del carbón activado; posteriormente el agua tratada es filtrada. Los experimentos se ejecutaron según un diseño factorial de $3^2 = 9$ tratamientos diferentes (3 = niveles y 2 = factores); con dos réplicas, evaluando los factores de tiempo de contacto (30, 60 y 90 min) y regeneración (0, 1 y 2 ciclos) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1*Diseño factorial 3²*

Tratamiento	Tiempo	Regeneración	Tiempo (min)	Regeneración (ciclos)	Respuesta (Capacidad de CA)
1	Bajo (-1)	Bajo (-1)	30	0	-
2	Medio (0)	Bajo (-1)	60	0	-
3	Alto (1)	Bajo (-1)	90	0	-
4	Bajo (-1)	Medio (0)	30	1	-
5	Medio (0)	Medio (0)	60	1	-
6	Alto (1)	Medio (0)	90	1	-
7	Bajo (-1)	Alto (1)	30	2	-
8	Medio (0)	Alto (1)	60	2	-
9	Alto (1)	Alto (1)	60	2	-

Para la regeneración el CA, se lavó con agua destilada caliente a 90 °C mediante agitación a 150 rpm durante 1 h y seguido de un secado a 85 °C por 12 h (Alau *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018; Kow *et al.* 2016). El CA utilizado por primera vez es regenerado para su reuso como el primer ciclo de generación (1 ciclo) y este CA reutilizado es una vez más regenerada como el segundo ciclo de regeneración (2 ciclo).

Cálculo de capacidad y porcentaje de remoción del carbón activado

Para el cálculo de la capacidad de adsorción del CA en el tiempo t , se aplicó la Ecuación (1) y el porcentaje de eliminación se calculó a partir de la Ecuación (2) (Bwatanglang *et al.* 2023; Patel *et al.* 2019).

$$q_t = \frac{C_o - C_t}{m} \times V \quad (1)$$

$$\% \text{Remoción} = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100 \quad (2)$$

Donde q_t muestra las cantidades de DQO, DBO₅ y parámetros microbiológicos adsorbidas por el CA en el tiempo t (mg/g o NMP/g) C_o y C_t representan las concentraciones de parámetros en la solución al inicio y al tiempo t , V es el volumen de la solución (L) y m es la masa de carbón activado (g).

Análisis de datos

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias, con la prueba de diferencias honestamente significativas (HSD) de Tukey en el software IBM SPSS v26. El nivel de significancia fue determinado a $p < 0,05$ a un nivel de probabilidad del 95 %.

RESULTADOS

Caracterización del agua residual doméstica

Las aguas residuales se recogieron del afluente de la “laguna de oxidación Cachiche” y se caracterizaron los siguientes parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, DQO, DBO₅, coliformes totales, coliformes termotolerantes y *E. coli*, los resultados son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2

Características de las aguas residuales

Parámetros	Cantidad	Unidad
pH	7,86	-
Temperatura	18,50	°C
C. Eléctrica	1490	μS/cm
DQO	375,6	mg L ⁻¹
DBO ₅	198,4	mg L ⁻¹
Coliformes totales	7,00 _x 10 ⁷	NMP/100 mL
Coliformes termotolerantes	3,50 _x 10 ⁷	NMP/100 mL
Escherichia coli	1,10 _x 10 ⁷	NMP/100 mL

Promedio de valores finales de los contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos

La Tabla 3 muestra los valores de los distintos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del ARD después del proceso de adsorción con CA. Se tuvo reducción de DQO, DBO₅, coliformes totales, coliformes termotolerantes y *E. coli*; mientras el pH y la temperatura no presentaron una variación considerable y la conductividad mostró una ligera disminución.

Tabla 3

Valor final de los parámetros tras el proceso de remoción

Tratamiento	pH	T (°C)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Coliformes totales (NMP/100 mL)	Coliformes Termo tolerantes (NMP/100 mL)	<i>E.Coli</i> (NMP/100 mL)
1	7,76	18,35	1469,50	125,65	256,65	5,40×10 ⁷	2,35×10 ⁷	5,15×10 ⁶
2	7,93	18,20	1488,50	121,80	261,45	3,40×10 ⁷	2,35×10 ⁷	3,10×10 ⁶
3	7,94	18,30	1488,00	119,50	256,65	2,90×10 ⁷	1,90×10 ⁷	3,15×10 ⁶
4	7,96	18,20	1439,00	144,50	295,50	5,25×10 ⁷	2,40×10 ⁷	9,95×10 ⁶
5	7,97	18,25	1439,50	138,05	250,65	5,00×10 ⁷	2,40×10 ⁷	9,65×10 ⁶
6	7,96	18,40	1434,50	138,20	233,40	3,95×10 ⁷	2,40×10 ⁷	8,30×10 ⁶
7	7,97	18,30	1436,00	148,45	335,80	5,60×10 ⁷	2,50×10 ⁷	1,05×10 ⁷
8	8,08	18,10	1433,00	137,65	318,25	5,45×10 ⁷	2,55×10 ⁷	1,05×10 ⁷
9	8,00	18,35	1441,50	144,65	256,65	4,80×10 ⁷	2,80×10 ⁷	5,78×10 ⁶

Capacidad de adsorción carbón activado y porcentaje de eliminación de contaminantes del agua residual

La Tabla 4 muestra la capacidad como la cantidad de contaminante adsorbida por gramo de CA y porcentaje de remoción (%). Los máximos valores fueron; para DBO5: 9,86 mg/g CA y 39,77 % en el tratamiento 3; para DQO: 17,5 mg/g y 37,86 % en el tratamiento 6; para coliformes totales: $5,13 \times 10^7$ NMP/g y 58,50 % en el tratamiento 3; para Coliformes termotolerantes: $2,00 \times 10^7$ NMP/g y 45,5 % en el tratamiento 3; para *E.Coli*: $9,84 \times 10^6$ NMP/g y 71,5 % en el tratamiento 2 y 3.

Tabla 4
Capacidad de adsorción del CA y porcentaje de remoción

Tratamiento	DBO5		DQO		Coliformes totales		Coliformes Termo tolerantes		E.Coli	
	mg/g	%	mg/g	%	NMP/g	%	NMP/g	%	NMP/g	%
1	9,09	36,67	14,50	31,67	$2,00 \times 10^7$	23,0	$1,44 \times 10^7$	33,0	$7,32 \times 10^6$	53,0
2	9,58	38,61	14,0	30,39	$4,50 \times 10^7$	51,5	$1,44 \times 10^7$	32,5	$9,89 \times 10^6$	71,5
3	9,86	39,77	15,0	31,67	$5,13 \times 10^7$	58,5	$2,00 \times 10^7$	45,5	$9,84 \times 10^6$	71,5
4	6,74	27,17	10,0	21,33	$2,19 \times 10^7$	25,0	$1,38 \times 10^7$	31,0	$1,32 \times 10^6$	9,50
5	7,54	30,42	15,5	33,27	$2,50 \times 10^7$	28,5	$1,38 \times 10^7$	31,0	$1,69 \times 10^6$	12,5
6	7,52	30,34	17,5	37,86	$3,82 \times 10^7$	43,5	$1,38 \times 10^7$	31,5	$3,38 \times 10^6$	24,5
7	6,24	25,18	4,50	10,60	$1,75 \times 10^7$	20,0	$1,25 \times 10^7$	29,0	$6,90 \times 10^6$	5,0
8	7,59	30,62	7,00	15,27	$1,94 \times 10^7$	22,0	$1,19 \times 10^7$	27,5	$6,25 \times 10^6$	4,50
9	6,72	27,09	6,50	14,39	$2,75 \times 10^7$	31,5	$8,78 \times 10^6$	20,0	$1,63 \times 10^6$	12,0

Se encontró que la regeneración tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) en la capacidad de adsorción de DBO₅ (Tabla 5). El resultado del modelo indica que el coeficiente de determinación (R^2) y los coeficientes de determinación ajustados (R^2) fueron 0,643 y 0,326.

Tabla 5
ANOVA de modelo cuadrático para capacidad de adsorción de DBO5

Origen	Tipo III de suma de cuadrados (SC)	gl	Media cuadrática (MC)	F	Sig.
Modelo corregido	27,855 ^a	8	3,481838	2,0292	0,156
Intersección	1117,226	1	1117,226	651,1424	$1,05 \times 10^9$
Tiempo	2,540033	2	1,270017	0,7401	0,504
Regeneración	24,53083	2	12,26542	7,1485	0,014
Tiempo*regeneración	0,783833	4	0,195958	0,1142	0,974
Error	15,44215	9	1,715794		
Total	1160,523	18			
Total, corregido	43,29685	17			

Nota. a. $R^2 = 0,643$ (R^2 ajustada = 0,326)

En la Tabla 6 se muestra la prueba de Tukey, donde la capacidad de adsorción de CA sin regeneración (9,51 mg/g CA) fue significativamente diferente y mayor a la capacidad del CA regenerado 1 (6,85 mg/g) y 2 veces (7,27 mg/g).

Tabla 6

Prueba Post hoc – Tukey para para capacidad de adsorción de DBO₅

Regeneración CA (ciclos)	N	HSD Tukey ^{a,b}	
		Subconjunto	
		1	2
2	6	^A 6,85	
1	6	^A 7,27	
0	6		^B 9,51
Sig.		0,849	1,00

Nota. a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000; b. Alfa = 0,05.

La Tabla 7 muestra que la regeneración tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) en la capacidad de adsorción de DQO. El resultado del modelo indica que el R^2 y R^2 ajustada fueron 0,821 y 0,663.

Tabla 7

ANOVA de modelo cuadrático para capacidad de adsorción de DQO

Origen	Tipo III de SC	gl	MC	F	Sig.
Modelo corregido	351,778 ^a	8	43,972	5,173	,012
Intersección	2426,722	1	2426,722	285,497	,000
Tiempo	36,111	2	18,056	2,124	,176
Regeneración	283,444	2	141,722	16,673	,001
Tiempo * regeneración	32,222	4	8,056	,948	,480
Error	76,500	9	8,500		
Total	2855,000	18			
Total corregido	428,278	17			

Nota. a. $R^2 = 0,821$ (R^2 ajustada = 0,663)

De la prueba de Tukey (Tabla 8), la capacidad de adsorción de DQO del agua residual con CA regenerado 2 veces (6,00 mg/g) fue significativamente diferente ($p < 0,05$) a la capacidad de adsorción del CA sin regeneración “0” y regenerado 1 vez; mientras que, la capacidad de adsorción de DQO con CA regenerado 1 vez (14,33 mg/g) y sin regeneración (14,50 mg/g) fueron significativamente iguales ($p > 0,05$), el cual indica que la capacidad del CA se mantuvo con la primera regeneración.

Tabla 8*Prueba Post hoc – Tukey para identificar la capacidad de regeneración del CA en la adsorción del DQO*

Regeneración CA (ciclos)	N	HSD Tukey ^{a,b}	
		Subconjunto	
		1	2
2	6	^A 6,00	
1	6		^B 14,33
0	6		^B 14,50
Sig.		1,00	0,995

Nota. a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000; b. Alfa = 0,05.

La Tabla 9 muestra que el tiempo de contacto y la regeneración del CA tuvieron un efecto significativo ($p < 0,05$) en la capacidad de adsorción de coliformes totales del agua residual. El resultado del modelo indica que el R^2 y R^2 ajustada son 0,809 y 0,639.

Tabla 9*ANOVA de modelo cuadrático para capacidad de adsorción de coliformes totales*

Origen	Tipo III de SC	gl	MC	F	Sig.
Modelo corregido	$2,417 \times 10^{14}$ ^a	8	$3,02 \times 10^{14}$	4,760	0,016
Intersección	$1,57 \times 10^{16}$	1	$1,57 \times 10^{16}$	247,243	0,000
Tiempo	$1,10 \times 10^{15}$	2	$5,52 \times 10^{14}$	8,701	0,008
Regeneración	$9,10 \times 10^{14}$	2	$4,55 \times 10^{14}$	7,171	0,014
Tiempo * regeneración	$4,02 \times 10^{14}$	4	$1,01 \times 10^{14}$	1,584	0,260
Error	$5,71 \times 10^{14}$	9	$6,35 \times 10^{13}$		
Total	$1,87 \times 10^{16}$	18			
Total corregido	$2,99 \times 10^{15}$	17			

Nota. a. $R^2 = 0,809$ (R^2 ajustada = 0,639)

De la prueba de Tukey (Tabla 10), la capacidad de adsorción de coliformes totales a 60 minutos ($2,98 \times 10^7$ NMP/g) y 90 minutos ($3,90 \times 10^7$ NMP/g) fueron significativamente iguales ($p > 0,05$); así mismo, la capacidad de adsorción a 30 minutos ($1,98 \times 10^7$ NMP/g) y 60 minutos ($2,9 \times 10^7$ NMP/g) fueron significativamente iguales ($p > 0,05$); mientras que la capacidad de adsorción a 30 minutos ($1,98 \times 10^7$ NMP/g) fue significativamente diferente a la capacidad de adsorción a 90 min ($3,90 \times 10^7$ NMP/g), indicando una mayor capacidad de adsorción a mayor tiempo de 90 min seguida de 60 min. Por otro lado, la capacidad de adsorción de coliformes totales con CA regenerado 1 vez ($2,84 \times 10^7$ NMP/g) y 2 veces ($2,15 \times 10^7$ NMP/g) fueron significativamente iguales; mientras la capacidad de adsorción con CA sin regeneración “0” ($3,88 \times 10^7$ NMP/g) fue diferente al regenerado 2 veces; finalmente, la capacidad de adsorción con CA regenerado 1 vez y sin regeneración fueron significativamente iguales, el cual indica que la capacidad del CA se mantuvo con la primera regeneración.

Tabla 10

Prueba Post hoc – Tukey para identificar el tiempo y la regeneración del CA en la capacidad de adsorción de coliformes totales

HSD Tukey ^{a,b}			
tiempo (min)	N	Subconjunto	
		1	2
30	6	^A 1,98×10 ⁷	
60	6	^A 2,98×10 ⁷	^B 2,98×10 ⁷
90	6		^B 3,90×10 ⁷
Sig.		0,130	0,169
Regeneración CA (ciclos)	N	Subconjunto	
		1	2
2	6	^A 2,15×10 ⁷	
1	6	^A 2,84×10 ⁷	^B 2,84×10 ⁷
0	6		^B 3,88×10 ⁷
Sig.		0,337	0,113

Nota. a. Emplea una muestra de tamaño 6,000 de la media armónica b. $\alpha = 0,05$.

La Tabla 11 muestra que la regeneración del CA tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) en la capacidad de adsorción de coliformes termotolerantes del agua residual. El resultado del modelo indica que el R² y R² ajustada son 0,738 y 0,504.

Tabla 11

ANOVA de modelo cuadrático para capacidad de adsorción de coliformes termotolerantes

Variable dependiente: coliformes termotolerantes					
Origen	Tipo III de SC	gl	MC	F	Sig.
Modelo corregido	1,33×10 ¹⁴ a	8	1,74×10 ¹³	3,163	0,053
Intersección	3,38×10 ¹⁵	1	3,38×10 ¹⁵	614,058	0,000
Tiempo	2,13×10 ¹²	2	1,06×10 ¹²	0,193	0,828
Regeneración	8,14×10 ¹³	2	4,07×10 ¹³	7,398	0,013
Tiempo * regeneración	5,57×10 ¹³	4	1,39×10 ¹³	2,530	0,114
Error	4,95×10 ¹³	9	5,50×10 ¹²		
Total	3,57×10 ¹⁵	18			
Total corregido	1,89×10 ¹⁴	17			

Nota. a. R²= 0,738 (R² ajustada = 0,504)

De la prueba de Tukey (Tabla 12), la capacidad de adsorción de coliformes termotolerantes con CA regenerado 1 vez (1,38×10⁷ NMP/g) y 2 veces (1,11×10⁷ NMP/g) fueron significativamente iguales; mientras que la capacidad de adsorción con CA sin regeneración “0” (1,63×10⁷ NMP/g) fue significativamente diferente a la capacidad de adsorción con CA regenerado 2 veces (1,11×10⁷ NMP/g); por otro lado, la capacidad de adsorción con CA regenerado 1 vez y sin regeneración fueron significativamente iguales, el cual indica que la capacidad del CA se mantuvo con la primera regeneración.

Tabla 12

Prueba Post hoc – Tukey para identificar la regeneración del CA en la capacidad de adsorción de coliformes termotolerantes

HSD Tukey ^{a,b}			
Regeneración CA (ciclos)	N	Subconjunto	
		1	2
2	6	^A $1,11 \times 10^7$	
1	6	^A $1,38 \times 10^7$	^B $1,38 \times 10^7$
0	6		^B $1,63 \times 10^7$
Sig.		0,165	0,213

Nota. a. Emplea una muestra de tamaño 6,000 de la media armónica b. $\alpha = 0,05$.

La Tabla 13 muestra que, la regeneración del CA tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) en la capacidad de adsorción de *E. Coli* del agua residual. El resultado del modelo indica que el R^2 y R^2 ajustada son 0,941 y 0,889.

Tabla 13

ANOVA de modelo cuadrático para capacidad de adsorción E. Coli

Origen	Tipo III de SC	gl	MC	F	Sig.
Modelo corregido	$2,414 \times 10^{14}$ ^a	8	$3,02 \times 10^{13}$	18,041	0,000
Intersección	$2,94 \times 10^{14}$	1	$2,94 \times 10^{14}$	175,759	0,000
Tiempo	$1,02 \times 10^{13}$	2	$5,09 \times 10^{12}$	3,044	0,098
Regeneración	$2,27 \times 10^{14}$	2	$1,13 \times 10^{14}$	67,748	0,000
Tiempo * regeneración	$4,58 \times 10^{12}$	4	$1,15 \times 10^{12}$	0,685	0,620
Error	$1,51 \times 10^{13}$	9	$1,67 \times 10^{12}$		
Total	$5,50 \times 10^{14}$	18			
Total corregido	$2,56 \times 10^{14}$	17			

Nota. a. $R^2 = 0,941$ (R^2 ajustada = 0,889)

De la prueba de Tukey (Tabla 14), la capacidad de adsorción con CA sin regeneración “0” ($9,02 \times 10^6$ NMP/g) fue significativamente diferente y mayor a la capacidad de adsorción del CA regenerado 1 vez ($2,13 \times 10^6$ NMP/g) y 2 veces ($9,80 \times 10^5$ NMP/g), señalando que la capacidad del CA se redujo con la primera y segunda regeneración.

Tabla 14

Prueba Post hoc – Tukey para identificar la regeneración del CA en la capacidad de adsorción de coliformes E. Coli.

HSD Tukey ^{a,b}			
Regeneración CA (ciclos)	N	Subconjunto	
		1	2
2	6	^A 9,80×10 ⁵	
1	6	^A 2,13×10 ⁶	
0	6		^B 9,02×10 ⁶
Sig.		0,320	1,000

Nota. a. Emplea una muestra de tamaño 6,000 de la media armónica b. $\alpha = 0,05$.

DISCUSIÓN

El porcentaje de remoción máxima de los parámetros evaluados en el tratamiento de aguas residuales domésticas de Cachiche con CA de leña de vid *Vitis vinífera* fue a un tiempo de contacto de 90 minutos y CA sin regeneración: 39,77 % de DBO₅, 37,86 % de DQO, 58,50 % de coliformes totales, 45,5 % de coliformes termotolerantes y 71,5 % de *E. Coli*, con un promedio de eficiencia del 50,4 %. Mientras, el pH y la temperatura en los tratamientos no tuvo una variación considerable, pero la conductividad presentó una ligera disminución. Es evidente la afinidad del CA en la adsorción de *E. coli*, el cual cuenta tiene una superficie celular compuesta por proteínas, carbohidratos, lípidos y otros componentes, que pueden tener carga eléctrica y estructuras químicas pueden interactuar mediante enlaces químicos débiles y sitios de adsorción física con los sitios activos en la superficie del CA por ser un material poroso que presenta una estructura en forma de red, además el proceso de adsorción se ve favorecido por la elevada concentración del *E. Coli* (Abbaset al., 2016; Ravasi et al., 2019). Esto conlleva a mencionar la teoría de la adsorción competitiva (Worch, 2010), donde las concentraciones más altas de los contaminantes son preferidas en los sitios de adsorción; por otra parte, las sustancias con menor concentración (débilmente adsorbibles) probablemente se adsorban en menor grado (Altmann et al., 2014), tales como el DBO₅ y DQO. Mientras que el menor grado de adsorción de coliformes totales y coliformes termotolerantes con respecto a *E. Coli*, puede deberse a que los coliformes termotolerantes que incluye principalmente a *E. Coli*, son un subgrupo de los coliformes totales, por lo que hay otras bacterias incluidas que no se han evaluado, las cuales pueden disminuir el porcentaje de remoción. En ese sentido Góngora y Llanos (2020), en filtros de CA de *Mauritia flexuosa* en el tratamiento de agua cruda de viviendas rurales, encontró un resultado diferente al obtenido en este estudio con una eliminación del 93,17 % de coliformes termotolerantes, 89,81 % de coliformes totales y 86,6 % de *E. Coli*, con una eficiencia media global de 74,38 %, por lo que se evidencia una buena afinidad del CA en la eliminación de las bacterias.

Sobre el porcentaje de remoción de DBO₅ y DQO, Sia et al. (2016), aplicando el CA a base de cáscara de coco, logró remover el 66 % de DQO del efluente de plantas de aceite de palma. Al igual que Azmi et al. (2015), con CA derivado del bagazo de caña de azúcar logró remover el 77,8 % de DQO, demostrando al CA obtenido de desechos como adsorbente prometedor para el tratamiento del agua residual. Por otro lado, Ruiz y Orbegoso (2019), evaluaron la efectividad del CA obtenido a partir del endocarpio de coco y

semillas de aguaje, logrando eliminar casi el 100 % de DBO₅ del agua residual de una DBO₅ inicial de 130 mg/L. Por otro lado, Nayl *et al.* (2017), removieron el 95,4 % y 92,8 % para DQO y DBO₅, respectivamente, con CA preparado a partir de desechos de cáscara de palma datilera; en ese sentido, la buena remoción posiblemente fue debido a que el agua no presentó mayor contaminación con bacterias y otras sustancias el cual no fue evaluado, además de que el CA fue obtenido de un material distinto; por ende, presenta un comportamiento diferente.

Respecto a la capacidad de adsorción, el CA sin regeneración “0” y a 90 minutos de tiempo de contacto; tuvo una capacidad de adsorción máxima de 9,86 mg DBO₅/g, coliformes totales ($5,13 \times 10^7$ NMP/g), coliformes termotolerantes ($2,00 \times 10^7$ NMP/g) y *E. Coli* ($9,84 \times 10^6$ NMP/g); por otro lado, a 90 minutos y con CA regenerada una vez se tuvo una capacidad máxima de 17,5 mg DQO/g. La buena capacidad de adsorción a tiempos cortos de hasta 90 minutos y cuando el CA es regenerada por primera vez demostraron la eficacia del CA en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Como señala Pongener *et al.* (2017), esta eliminación/reducción se atribuye a la presencia de numerosos poros de diferentes tamaños y también la posible superficie extensa del CA que proporcionan suficientes sitios activos que pueden atrapar fácilmente a las bacterias y diversas sustancias dentro del adsorbente, que se remueve al filtrar el agua tratada con el CA haciendo que la muestra de agua esté libre de contaminantes. En ese sentido, en la literatura se reportó elevada capacidad de adsorción del biocarbón; por ejemplo, el biocarbón de madera de sauce como el biocarbón de paja tuvieron una capacidad media de *E. coli* de más de $5,5 \times 10^5$ UFC/g, llegando a un 88 % de tasa de eliminación (Guan *et al.*, 2020). Por otro lado, la eliminación por adsorción de *E. coli* mediante el uso de nanocompuestos de quitosano-sílice/carbonato de calcio (CS-SiO₂/CaCO₃) sintetizado de los desechos de cáscara de huevo y cascarilla de arroz lograron una eficiencia de adsorción del 80 % *E. coli* en 35 minutos de tiempo de contacto con una capacidad de adsorción de $3,18 \times 10^1$ CFU/g.

Respecto a la evaluación del efecto del tiempo de contacto en la capacidad de adsorción de DBO₅, DQO, coliformes termotolerantes y *E. Coli*, los diferentes tiempos de contacto no tuvieron un efecto significativo, pero se observó un ligero incremento en la capacidad de adsorción a mayor tiempo de 30 a 90 minutos; mientras que, para la adsorción de coliformes totales el efecto del factor tiempo fue significativo ($p < 0,05$), con una mayor capacidad de adsorción a 90 minutos; por lo tanto, el tiempo de contacto óptimo fue de 90 minutos en el tratamiento de aguas residuales. Resultados similares obtuvieron Chavez y Rojas (2020), quienes encontraron que a mayor tiempo de contacto del CA de 30 minutos a 70 minutos mejora el tratamiento del efluente, en específico en la remoción de DBO₅, DQO y huevos de helmintos. Así mismo, Silupú *et al.* (2017), en caso de la capacidad antimicrobiana de CA a diferentes tiempos de siembra de 0, 30, 60, 90 y 120 minutos pudo observar una disminución de la carga microbiana a medida que aumenta el tiempo de contacto en la solución microbiana (*E. Coli*, *Salmonella typhimurium* y *Shigella flexneri*). En ese sentido, el CA presentó una buena capacidad de adsorción a tiempos inferiores de 90 minutos.

La regeneración del CA de *Vitis vinifera* tuvo un efecto significativo en la capacidad de adsorción de DBO₅, DQO, coliformes termotolerantes, *E. Coli* y coliformes totales. Comprando el CA sin regeneración con 1 y 2 veces regenerada, se obtuvo mejor resultado de capacidad de adsorción con el CA sin regeneración, el cual fue cercana al CA con una regeneración; demostrando la buena regeneración del CA. Por lo que, al utilizar agua destilada caliente para lavar el CA utilizado fue eficiente para limpiar la superficie y los poros del CA de los materiales unidos físicamente, con la mínima interacción química, restableciendo la capacidad de sorción del CA, aumentando su vida útil y a su vez reduciendo los costos de tratamiento del agua residual. Un resultado cercano obtuvo Oladejo *et al.* (2020), quienes encontraron que el rendimiento de la adsorción del CA regenerado mejoró con una recuperación de ~83 % y ~90 % de la capacidad de

adsorción de CA fresco en la adsorción de yodo y azul de metileno. Asimismo, Alau et al. (2015), estudió la regeneración y reuso del CA de Cáscara de Neem en tratamiento de aguas residuales hospitalarias; realizó el lavado del CA utilizado con agua destilada caliente, hasta cuatro veces; tras el reuso encontraron que la capacidad del CA disminuye a medida que aumenta el número de ciclos de regeneración. La eliminación de DQO y DBO₅ disminuyeron del 60 % al 7 % y del 80 % al 60 % respectivamente a medida que el ciclo transcurría de 1 a 5. Las cargas bacterianas y fúngicas durante todos los ciclos tuvieron una eliminación del 92 % y 99 % incluso en el quinto ciclo. En esta línea, es importante destacar que el proceso de regeneración del CA empleado está considerablemente influenciado por factores como la metodología de regeneración empleada, el tipo de contaminantes a los que estuvo expuesto el CA fresco, la frecuencia de reutilización y el origen mismo del carbón activado.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos a un tiempo de contacto de 90 minutos y CA sin regeneración, se tuvo mayores porcentajes de remoción y capacidades de adsorción de DBO₅ (39,77 %, 9,86 mg/g), coliformes totales (58,50 %, $5,13 \times 10^7$ NMP/g), coliformes termotolerantes (45,5 %, $2,00 \times 10^7$ NMP/g) y *E. coli* (71,5 %, $9,84 \times 10^6$ NMP/g); mientras que, para DQO se obtuvo mayores valores de 37,86 % y 17,5 mg/g a un tiempo de contacto de 90 minutos y con CA regenerada una vez. Según el análisis estadístico, el tiempo de contacto del CA no tuvo un efecto significativo ($p > 0,05$) en la capacidad de adsorción de DBO₅, DQO, coliformes termotolerantes y *E. Coli*, pero hubo un ligero incremento de la capacidad a un mayor tiempo de contacto; por el contrario, para coliformes totales el efecto del factor tiempo fue significativo ($p < 0,05$), donde la mayor capacidad fue a 90 minutos; por lo tanto, el tiempo de contacto óptimo en la adsorción fue de 90 minutos; mientras que la regeneración del CA tuvo un efecto significativo en la capacidad de adsorción de DBO₅, DQO, coliformes totales, coliformes termotolerantes y *E. Coli*, donde las máximas capacidades de adsorción se presentó con CA sin regeneración, el cual fue cercano a la capacidad de CA con una regeneración; por lo que, el CA de leña de *Vitis vinifera* fue eficaz en el tratamiento de aguas residuales doméstica de Cachiche, Ica.

REFERENCIAS

- Abbas, M., Al-Ani, M., & Al-Khalidi, S. (2016). Adsorption of Coliform Bacteria from water by Activated Carbon. *Engineering and Technology Journal*, 34(9), 1782–1788. https://etj.uotechnology.edu.iq/article_116082_da25aae59320d38c898eb597b6f724e4.pdf
- Alau, K., Gimba Casimir, E., Agbaji Bolanle, E., Abechi Eyije, S., Hajara, O., Emeka, N., & Yilleng Moes, T. (2015). Regeneration and Reuse of Neem Husk Activated Carbon in Hospital Wastewater Treatment. *The International Journal of Science & Technoledge* 3(10), 154–157.
- Altmann, J., Ruhl, A. S., Zietzschmann, F., & Jekel, M. (2014). Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. *Water Research*, 55, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.025>

- Azmi, N. B., Bashir, M. J. K., Sethupathi, S., Wei, L. J., & Aun, N. C. (2015). Stabilized landfill leachate treatment by sugarcane bagasse derived activated carbon for removal of color, COD and NH₃-N - Optimization of preparation conditions by RSM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 1287–1294. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.12.002>
- Balogun, S., & Ogwueleka, T. C. (2021). Coliforms removal efficiency of Wupa wastewater treatment plant, Abuja, Nigeria. *Energy Nexus*, 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100024>
- Bwatanglang, I. B., Magili, S. T., Mohammad, F., Al-Lohedan, H. A., & Soleiman, A. A. (2023). Biomass-Based Silica/Calcium Carbonate Nanocomposites for the Adsorptive Removal of Escherichia coli from Aqueous Suspensions. *Separations*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/separations10030212>
- Chavez, J. A., & Rojas, L. S. (2020). *Disminución de huevos de helmintos en aguas residuales domésticas mediante el carbón activado de uva (Vitis vinifera), Puente Piedra-2020*. [Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo].
- De Gisi, S., Casella, P., & Notarnicola, M. (2017). Grey Water. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 4. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10162-9>
- Environment and Natural Resources Department. (2022). Wastewater as Resources. In *European Investment Bank*.
- Gkika, D. A., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2022). Why reuse spent adsorbents? The latest challenges and limitations. *Science of the Total Environment*, 822, 153612. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153612>
- Góngora, R. C., & Llanos, C. L. (2020). *Eficiencia del filtro de carbón activado de mauritia flexuosa, en el tratamiento de agua cruda del caserío Medellín, Moyobamba, 2020* [Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/73006/Gongora_RRC-Llanos_CCL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guan, P., Prasher, S. O., Afzal, M. T., George, S., Ronholm, J., Dhiman, J., & Patel, R. M. (2020). Removal of Escherichia coli from lake water in a biochar-amended biosand filtering system. *Ecological Engineering*, 150, 105819. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105819>
- Jagadeesh, N., & Sundaram, B. (2023). Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>
- Koul, B., Yadav, D., Singh, S., Kumar, M., & Song, M. (2022). Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. *Water (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/w14213542>
- Kow, S. H., Fahmi, M. R., Abidin, C. Z. A., Ong, S. A., & Ibrahim, N. (2016). Regeneration of spent activated carbon from industrial application by NaOH solution and hot water. *Desalination and Water Treatment*, 57(60), 29137–29142. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1168133>

- Li, L., Zou, D., Xiao, Z., Zeng, X., Zhang, L., Jiang, L., Wang, A., Ge, D., Zhang, G., & Liu, F. (2019). Biochar as a sorbent for emerging contaminants enables improvements in waste management and sustainable resource use. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1324–1342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.087>
- Mayta-Armas, A., Canchanya-Huaman, Y., Ramos-Guivar, J. A., Pomalaya-Velasco, J., Bendezú-Roca, Y., & Checca-Huaman, N. (2023). Enhanced Removal of As (V) and Pb (II) from Drinking and Irrigating Water Effluents Using Hydrothermally Synthesized. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15101892>
- Murcia-salvador, A., Pellicer, J. A., Rodríguez-López, M., Gómez-López, V., Núñez-Delicado, E., & Gabaldon, J. (2020). Egg By-Products as a Tool to Remove Direct Blue Desorption Properties. *Materials*, 13. <https://doi.org/10.3390/ma13061262>
- Nayl, A. E. A., Elkhashab, R. A., Malah, T. El, Yakout, S. M., El-Khateeb, M. A., Ali, M. M. S., & Ali, H. M. (2017). Adsorption studies on the removal of COD and BOD from treated sewage using activated carbon prepared from date palm waste. *Environ Sci Pollut Res*, 24(1), 22284–22293. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9878-4>
- Oladejo, J., Shi, K., Chen, Y., Luo, X., Gang, Y., & Wu, T. (2020). Closing the active carbon cycle: Regeneration of spent activated carbon from a wastewater treatment facility for resource optimization. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 150, 107878. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107878>
- Pal, S., Joardar, J., & Myong, Song, J. (2006). Removal of E. coli from Water Using Surface-Modified Activated Carbon Filter Media and Its Performance over an Extended Use. *Nviron. Sci. Technol.*, 40(19), 6091–6097. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es060708z>
- Patel, P., Muteen, A., & Mondal, P. (2019). Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column. *Science of the Total Environment*, 134586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134586>
- Pongener, C., Bhomick, P., Upasana Bora, S., Goswamee, R. L., Supong, A., & Sinha, D. (2017). Sand-supported bio-adsorbent column of activated carbon for removal of coliform bacteria and Escherichia coli from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(9), 1897–1904. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1274-6>
- Ravasi, D., König, R., Principi, P., Perale, G., & Demarta, A. (2019). Effect of Powdered Activated Carbon as Advanced Step in Wastewater Treatments on Antibiotic Resistant Microorganisms. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 20(1), 63–75. <https://doi.org/10.2174/1389201020666190207095556>
- Ruiz, L., & Orbegoso, K. Y. (2019). *Eficiencia del carbón activado obtenido a partir del endocarpo de “coco” (Cocos nucifera) y semilla de “aguaje” (Mauritia flexuosa), en la remoción de la DBO5 de las aguas residuales domésticas en el distrito de Habana – Moyobamba, 2018* [Tesis de pregrado en Ingeniero Sanitariol, Universidad Nacional de San Martín Tarapoto]. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3345>

- Sashikesh, G., Anushkaran, P., Praveena, Y., Arumukham, M., Kugamoorthy, V., & Kandasamy, V. (2023). A comparison study of the efficacy of different activated charcoals derived from Palmyra kernel shell in removing phenolic compounds. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 6, 100355. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100355>
- Sia, Y. Y., Tan, I. A. W., & Abdullah, M. O. (2016). Adsorption of colour, TSS and COD from palm oil mill effluent (POME) using acid-washed coconut shell activated carbon: Kinetic and mechanism studies. *MATEC Web of Conferences*, 87. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20178703010>
- Silupú, C. R., Solís, R. L., Cruz, G. J. F., Gómez, M. M., Solís, J., & Keiski, R. (2017). Caracterización de filtros comerciales para agua a base de carbón activado para el tratamiento de agua del río Tumbes - Perú. *Revista Colombiana de Química*, 46(3), 37–45. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-28042017000300037&script=sci_arttext
- Wang, W., Du, Z., Deng, S., Vakili, M., Ren, L., Meng, P., Maimaiti, A., Wang, B., Huang, J., Wang, Y., & Yu, G. (2018). Regeneration of PFOS loaded activated carbon by hot water and subsequent aeration enrichment of PFOS from eluent. *Carbon*, 134, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.005>
- Worch, E. (2010). Competitive adsorption of micropollutants and NOM onto activated carbon: Comparison of different model approaches. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 59(5), 285–297. <https://doi.org/10.2166/aqua.2010.065>
- Zela, J., & Olivas, G. (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*. SUNASS.