



Elección del medio de soporte para un reactor anaerobio de crecimiento adherido

Sebastián Camilo Moran Paz¹

Diana Carolina Romo Benavides²

Tatiana Mañunga³

Paola Ortega Guerrero⁴

Resumen

Entre las alternativas para tratar las aguas residuales están los reactores anaerobios de crecimiento adherido, que son sistemas biológicos que permiten la eliminación de materia orgánica. La elección del medio de soporte en ellos influye en su diseño y, sobre todo, en la remoción de cargas contaminantes. Así, el objetivo de esta investigación fue seleccionar dos materiales como medio de soporte para uno de ellos, a escala de laboratorio. Se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos para la identificación de los medios de soporte más comúnmente empleados. Los medios encontrados fueron caracterizados en función del peso, resistencia, costos, disponibilidad en la zona, porosidad, reacción con el agua residual y nivel de adherencia, como principales requisitos deseables para materiales de soporte. Posteriormente, se construyó una matriz de comparación con tres escalas y, cada característica fue evaluada en función del requerimiento. Los resultados parciales mostraron que es común el uso de carbón activado, vidrio sinterizado, espumas de poliuretano (EPU) y manguera conduflex corrugada. La matriz de comparación arrojó que la espuma de poliuretano y la manguera conduflex corrugada son los dos materiales más adecuados para implementarse en un reactor.

Palabras clave: agua residual; medio de soporte; reactor anaerobio.

¹ Universidad Mariana, Programa Ingeniería Ambiental, Colombia. Correo: semoran@umariana.edu.co

² Universidad Mariana, Programa Ingeniería Ambiental, Colombia. Correo: diaromo@umariana.edu.co

³ Universidad Mariana, Programa Ingeniería Ambiental, Colombia. Correo: tmanunga@umariana.edu.co

⁴ Universidad Mariana, Programa Ingeniería Ambiental, Colombia. Correo: portega@umariana.edu.co



Introducción

Los medios de soporte son fundamentales a la hora de diseñar, construir y arrancar un reactor, ya que es a través de este lecho filtrante donde se forma la biopelícula que, más adelante se convertirá en el tratamiento biológico del efluente del reactor. Según González y Gómez (2016)

La actividad biológica se aprovecha [principalmente] para remover del agua residual, principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, mediante el proceso de conversión a gases y en biomasa extraíble mediante el proceso de sedimentación. La actividad biológica también se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual. (p. 32)

Con base en lo anterior, es clave resaltar que, en la bibliografía de Romero (2005) existen cuatro grupos principales de procesos biológicos: aerobios, anóxicos, anaerobios y combinados, aerobios con anóxicos o anaerobios. Dentro de cada grupo hay, además, diferentes tipos, dependiendo si el proceso es de crecimiento biológico suspendido, crecimiento biológico adherido o, una combinación de ellos. Asimismo, dependiendo del régimen de flujo predominante, los procesos biológicos son considerados de flujo continuo o intermitente y, del tipo de mezcla completa, flujo en pistón o flujo arbitrario.

Así pues, dentro del trabajo de investigación, se eligió una alternativa como tratamiento secundario, donde se hizo uso de los tratamientos anaerobios. Según Orozco (2005), estos se han mostrado altamente competitivos para el tratamiento grueso de las aguas residuales domésticas (ARD) y las aguas residuales industriales (ARI). Este proceso de degradación de la materia orgánica (MO) se lleva a cabo a través de microorganismos anaerobios, en ausencia de oxígeno, una de las condiciones que determinan la producción de gas metano dentro del reactor.

Ahora bien, para hacer una adecuada selección de los materiales que se utiliza como medio de soporte, se debe tener en cuenta que, en superficies rugosas se incrementa la tasa de crecimiento de la biopelícula. En el medio de soporte ocurren dos fases para la formación de la misma: la primera, es la de adherencia y, la segunda, la de crecimiento por parte de la biomasa adherida en la fase anterior; finalmente, el medio de contacto está totalmente cubierto por una biopelícula con una compleja estructura de grupos de células microbiales. En definitiva, el propósito de un lecho filtrante es asegurar la formación de biomasa, además de mejorar el flujo uniforme dentro de un reactor.





Desarrollo

Elaboración de matriz para selección de medios de soporte

Descripción de la zona de estudio

La investigación se desarrolló en la zona del campus universitario Alvernia de la Universidad Mariana, donde están ubicados los laboratorios que cumplen con infraestructura física adecuada a los estándares internacionales de calidad, que permiten el diseño y ejecución del filtro, para llevar a cabo las pruebas necesarias. A continuación, en la Figura 1 se presenta una fotografía de la zona de la realización de estudio.

Figura 1

Campus Universitario Sede Alvernia

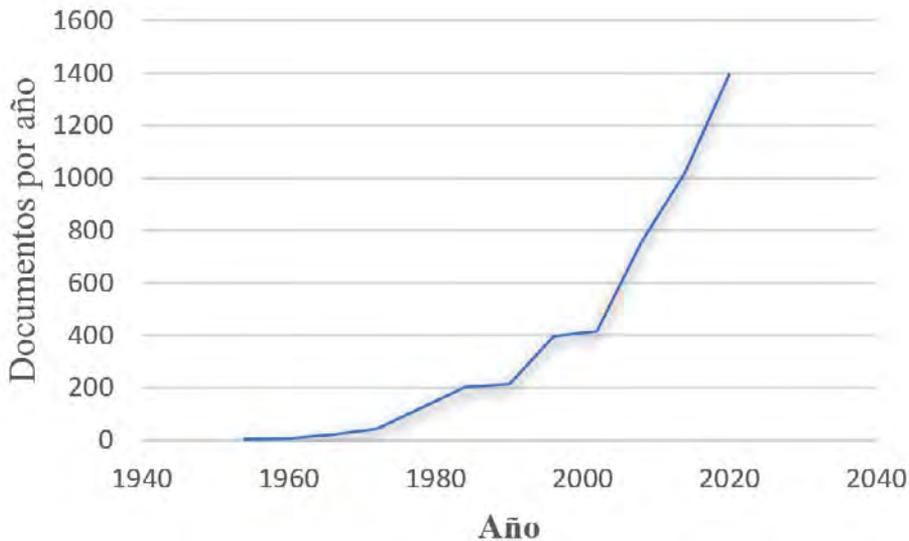


El campus universitario se ubica en la ciudad de San Juan de Pasto, en el corregimiento de Mapachico, sobre las faldas del volcán Galeras, a 800 metros después del Hospital San Pedro; hace parte de la comuna número 8 de la ciudad; posee múltiples vías para facilitar su acceso; la sede se halla a una altura de 2637 m s.n.m., 1°13'11"N 77°17'54"W (Google Earth, 2020). Presenta una temperatura promedio de 10 °C. En cuanto a la precipitación, tiene un comportamiento bimodal con dos periodos lluviosos y dos secos en el año; la distribución espacial de las lluvias medias anuales en la ecorregión muestra variaciones mayores a 900 mm anuales de lámina precipitada. La humedad relativa media multianual de la zona es del 87 %. En la Figura 2 se aprecia el mapa topográfico de la ubicación de la zona donde se lleva a cabo la idea de investigación.



Figura 2

Cantidad de artículos científicos relacionados con medios filtrantes



Metodología

Para alcanzar el objetivo fue necesario identificar qué tipo de materiales se puede utilizar como medio de soporte, al igual que, los materiales más comúnmente empleados en reactores para el crecimiento de microorganismos. Para esto se realizó una búsqueda de literatura en diferentes fuentes como Scielo, Scopus y Google Scholar, haciendo uso de palabras clave como *filter medium*, *anaerobic reactor* y *residual water*.

A partir de estos resultados, se puede determinar que el tema central de investigación es de interés, ya que genera un aporte significativo a la creación e implementación de nuevos métodos, para identificar medios de soporte para la disminución de cargas contaminantes en aguas residuales. Algunos de los avances relacionados con el tema de investigación son citados a continuación.

Para identificar los medios de soporte, fue necesario apoyarse en los criterios recomendados por De Lemos Chernicharo (2007), por quien se comprende qué características debe tener un medio de soporte y por qué son importantes, criterios como porosidad, resistencia, área, disponibilidad en la zona, costo, reacción con el agua residual y nivel de adherencia.

Materiales y métodos

El primer paso para lograr alcanzar el objetivo de la investigación fue tener en cuenta una matriz de comparación, en la cual se consideró los materiales seleccionados con base en la bibliografía y los criterios recomendados por De Lemos Chernicharo (2007).



El análisis de los resultados se efectuó con la matriz adaptada de la selección de materiales, respecto a las características de cada material, como nivel de adherencia, costo del material, porosidad, peso, resistencia y disponibilidad en la zona.

Una vez definidos y seleccionados los materiales para ser usados como medios filtrantes, se hizo una caracterización, enfocada en el peso, densidad, porosidad y tamaño. La caracterización se desarrolló en los laboratorios de física en el Campus Universitario Alvernia, con acompañamiento de ingenieros especializados.

Resultados y Análisis

Se presenta los resultados obtenidos después de analizar los diferentes tipos de materiales para ser usados como medios filtrantes. El análisis de los resultados se realiza con la matriz adaptada de la selección de materiales, con respecto a las características de cada material, como nivel de adherencia, costo del material, porosidad, peso, resistencia y disponibilidad en la zona, como se evidencia en la Tabla 1.



Tabla 1

Características a tener en cuenta para la valoración de la matriz

Medio Filtrante	Nivel de adherencia	Costo del material	Porosidad	Reacción con el agua residual	Disponibilidad en la zona	Peso (Densidad)	Resistencia
Carbón Activado	Alto	Alto	Alta	Inerte	No disponible	2.1 g/cm ³	Alta resistencia
Arena	Alto	Bajo	Baja	Inerte	Disponible	1.45 g/cm ³	Alta resistencia
Antracita	Alto	Alto	Alta	Inerte	No disponible	0.43 g/cm ³	Alta resistencia
Vidrio Sinterizado	Alto	Alto	Baja	Inerte	Disponible	2.9 g/cm ³	Alta resistencia
Cápsulas de café rotas	Medio	Bajo	Baja	Inerte	Disponible	0.04 g/cm ³	Parcialmente resistente



Espumas de poliuretano (EPU)	Alto	Bajo	Alta	Inerte	Disponible	0,012 g/cm ³	Liviano	Alta resistencia
Ladrillo cerámico refractario	Alto	Bajo	Bajo	Inerte	Disponible	1,60g/cm ³	Ligeramente liviano	Alta resistencia
Manguera conduflex	Alto	Bajo	Baja	Inerte	Disponible	0.67 - 0.97 g/cm ³	Liviano	Alta resistencia
Piedras volcánicas	Alto	Bajo	Baja	Inerte	Disponible	3.1 g/m ³	Pesado	Alta resistencia

Una vez definida la caracterización de los materiales, se procedió a evaluar, de acuerdo con el puntaje, con una escala numérica, donde son asignados valores a cada material, los cuales oscilan entre 1, 3 y 5, donde 1 no cumple con el requerimiento, 3 cumple parcialmente y 5 cumple con el requerimiento. como se evidencia en la Tabla 2.

Tabla 2

Matriz de selección de materiales

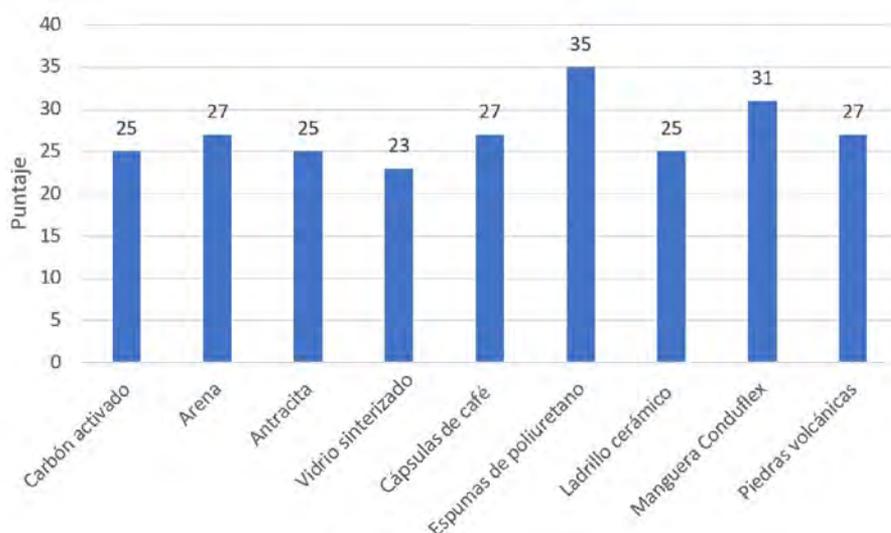
Medio Filtrante	Nivel de adherencia	Costo del medio	Porosidad	Reacción con el agua residual	Disponibilidad en la zona	Peso	Resistencia	Puntaje Total
Carbón activado	5	1	5	5	1	3	5	25
Arena	5	5	1	5	5	3	3	27
Antracita	5	1	5	5	1	3	5	25
Vidrio sinterizado	5	1	1	5	5	1	5	23
Cápsulas de café rotas	3	5	1	5	5	5	3	27
Espumas de poliuretano	5	5	5	5	5	5	5	35
Ladrillo cerámico refractario	5	1	1	5	5	3	5	25
Manguera condurflex	5	5	1	5	5	5	5	31
Piedras volcánicas	5	5	1	5	5	1	5	27

Los resultados parciales mostraron que, es común el uso de carbón activado, vidrio sinterizado, EPU y manguera conduflex corrugada en reactores anaerobios de crecimiento adherido (RACA). La matriz de comparación arrojó que la EPU y la manguera conduflex corrugada son los dos materiales más adecuados para implementarse en un RACA.

Por lo anterior, se obtuvo puntajes de 35 para las EPU y 31 para la manguera conduflex corrugada. En la Figura 3 se puede observar que, el material con puntaje más bajo es el vidrio sinterizado, con un puntaje de 23, dado que no cumple con las condiciones requeridas, obteniendo puntajes mínimos en las características de peso, porosidad y costo.

Figura 3

Resultados Matriz de Selección



Haciendo un análisis cualitativo de la abscisa y ordenada que se encuentra en la Figura 3, se ve reflejado que los materiales que obtuvieron mayor puntaje, cumplen con las características, ya que presentan alta porosidad, bajo costo y peso óptimo según los requerimientos.

Una vez definidos los materiales, se procedió a realizar su adquisición, de diferentes maneras: la manguera conduflex corrugada, por medio de compra, cuyo costo no es elevado, pero también su adquisición se puede hacer por medio de reciclaje, por ejemplo, en las construcciones, donde existen desechos de este material, el cual puede ser muy útil; igualmente, por medio de una recolección de recipientes de jabones líquidos en zonas urbanas de la ciudad de Pasto. Posteriormente, se hizo un acondicionamiento del material, a través de una limpieza y desinfección manual.



Figura 4

Manguera conduflex corrugada



El segundo material filtrante es la EPU, en el que se tuvo en cuenta su espesor, ya que es un elemento muy versátil y de alta porosidad; la recolección se llevó a cabo en la ciudad de Pasto, después de hacer varias cotizaciones en los establecimientos comercializadores; luego, se revisó la norma técnica, con el fin de cumplir con las especificaciones del sector de diagnóstico y remediación ambiental.

Figura 5

Espuma de Poliuretano



Caracterización de los materiales elegidos como medio de soporte (porosidad, peso, densidad, tamaño)

Preparación de los materiales como lecho filtrante

Acondicionamiento del material

Para realizar el acondicionamiento de la EPU y de la manguera conduflex corrugada para ser usados como lecho filtrante, se tuvo en cuenta algunas etapas:

Figura 6

Diagrama de etapas



Después de la recolección, los materiales fueron transportados hacia las instalaciones de la Universidad Mariana, sede Alvernia, laboratorio de física, facultad de Ingeniería, donde se muestreó tres metros de manguera conduflex corrugada y un metro cuadrado de EPU de 4,5 centímetros de espesor.

Una vez listo el material, se procedió a realizar cortes de forma simétrica (Figura 7), con el fin de que la biopelícula tuviera una mejor adherencia al área superficial de la espuma y obtener así, una disminución de las cargas orgánicas en el momento de realizar una caracterización del efluente.

Figura 7

Dimensionamiento de los materiales usados como lechos filtrantes en el RACA





Según Prieto y Velásquez (2018), los aspectos operacionales son también importantes para evitar taponamientos en el filtro; los tamaños de material para el filtro, reportados como los de mejores resultados, varían entre 2.5 y 7.5 cm, con tamaño uniforme desde la parte superior hasta el fondo. Un material más fino en el cuerpo del lecho puede ocasionar obstrucciones y, un material más grueso puede arrojar un efluente de peor calidad. Con base en lo anterior y, tomando las recomendaciones citadas, se estableció el tamaño de la EPU y la manguera de conduflex corrugada, con 3 cm de largo y de 3 cm de diámetro, tratando de mantener la misma forma y área superficial para que no exista variación al momento de realizar las pruebas con trazadores en el RACA.

Caracterización de los materiales como lecho filtrante

Se llevó a cabo una caracterización de los dos medios filtrantes seleccionados en la matriz, espumas y manguera conduflex corrugada, con el propósito de cumplir y comprobar los criterios que puntuaron de acuerdo con la bibliografía, para lo cual se hizo ensayos de laboratorio para cada material; las pruebas arrojaron los siguientes resultados:

Manguera conduflex corrugada

Para realizar las pruebas de peso, volumen, densidad real y aparente de cada uno de los materiales usados como medio de soporte en el RACA, se tomó como referencia a Palacios-Díaz y Criado (2016), quienes abordan la flotación como una forma de hacer ver una aplicación del concepto de densidad. De ahí que, se hizo el análisis de ejemplos donde se compara los valores de las densidades de un líquido y del sólido inmerso en él (magnitudes que forman parte de las expresiones del empuje del líquido y del peso del sólido, respectivamente).

Pruebas de peso, volumen y densidad

Para los respectivos cálculos se tomó una muestra de 10 cm de largo de la manguera, se procedió a pesarla, obteniendo un valor de 3,42 g; para hallar su volumen se tuvo en cuenta un volumen de agua inicial en una probeta de 20 cm³, que se llenó hasta 10 cm³; posteriormente, se introdujo la muestra de manguera para hallar su volumen; este valor se obtiene a partir del volumen inicial de agua desplazado; en la probeta se logra un valor final de 16 cm³, por lo que se puede hacer una resta y, finalmente, encontrar el volumen con un valor de 6 cm³. Una vez hallados el peso y el volumen se calculó su respectiva densidad:



Ecuación 1

Cálculo de la densidad

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{3,42 \text{ g}}{6 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 0.57 \text{ g/cm}^3$$

Con esta densidad, se logró comprobar que es un medio filtrante liviano y cumple con el requerimiento de la matriz.

Figura 8

Ensayo determinación de volumen de manguera conduflex corrugada



Espumas de poliuretano

Pruebas de peso, volumen, densidad y porosidad

Para calcular el peso, volumen y porosidad de la espuma se tuvo en cuenta una muestra cortada en una figura cuadrada de 8 cm de largo, 8 cm de ancho y 4 cm de espesor. Luego, se pesó en la balanza para saber su peso, obteniendo un valor de 3,1 g; para su volumen se realizó el cálculo por medio de:



Ecuación 2

Cálculo volumen de las espumas

$$\begin{aligned}
 v &= L \cdot L \cdot L \\
 v &= 8 \text{ cm} \cdot 8 \text{ cm} \cdot 4 \text{ cm} \\
 v &= 256 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Con lo anterior, se logró determinar la densidad aparente ya que, en cuerpos porosos, existe una deformación; se realizó de la siguiente manera:

Ecuación 3

Densidad aparente espumas

$$\begin{aligned}
 \rho. \text{ aparente espuma} &= \frac{3,1 \text{ g}}{256 \text{ cm}^3} \\
 \rho. \text{ aparente espuma} &= 0,12 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

Con respecto a la densidad real, se tuvo en cuenta el siguiente ensayo:

Se utilizó dos probetas con volúmenes diferentes: una de 250 cm³ y otra de 500 cm³; se introdujo a espuma a presión en la probeta 1 y se le agregó 150 cm³ de agua; se repitió el procedimiento en la probeta 2, logrando como resultado que, en ambas, se desplazó 6 cm³ de agua, lo que reflejó que ese sería el volumen real de la espuma.

Ecuación 4

Densidad real espumas

$$\begin{aligned}
 \rho. \text{ real espuma} &= \frac{3,1 \text{ g}}{6 \text{ cm}^3} \\
 \rho. \text{ real espuma} &= 0,52 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}
 \end{aligned}$$



Figura 9

Ensayo determinación densidad real espuma



Determinación capacidad de absorción

Para determinar la capacidad de absorción de la espuma se realizó un ensayo con un *beaker* y agua; con el peso inicial de la espuma se procedió a sumergirla en el recipiente con agua; se dejó que absorbiera agua hasta su punto de saturación; se taro la balanza con el *beaker*, para poder definir el peso de la espuma en su punto de saturación con el agua.

Ecuación 5

Capacidad de absorción

$$\begin{aligned}
 &\textit{Capacidad de absorción} \\
 &= \textit{peso de la esp. saturada} \\
 &\quad - \textit{peso de la esp. en estado natural} \\
 &\textit{Capacidad de absorción} = 100,06 \textit{ g} - 3,1 \textit{ g} \\
 &\textit{Capacidad de absorción} = 96,96 \textit{ g de agua absorbida}
 \end{aligned}$$



Figura 10

Ensayo determinación capacidad de absorción

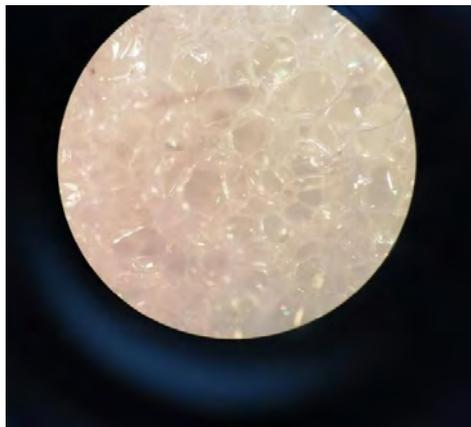


Haciendo una relación entre las partes de la espuma y el agua absorbida, se puede determinar que, por cada gramo de espuma, se almacenó aproximadamente 32 g de agua; por lo tanto, también se puede hacer una relación con una alta porosidad de la espuma.

Para la porosidad de la espuma también se sometió la misma a pruebas microscópicas; el resultado reflejó que tiene un alto porcentaje de poros, como se puede observar en la Figura 11.

Figura 11

Tamaño de los poros en la espuma observada desde el microscopio



Después, haciendo uso de los datos recolectados con los pasos descritos, se tuvo en cuenta la ecuación utilizada por Sangucho y Rodríguez (2018):



Ecuación 6

Porcentaje de porosidad espumas

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{P_2 - P_1}{P_2} \cdot 100$$

...donde:

P2: peso del material acondicionado saturado, g

P1: peso del material acondicionado, g

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{100,06_g - 3,1_g}{100,06_g} \cdot 100 = 96.9 \%$$

Conclusiones

La caracterización de medios filtrantes por medio de matrices permite hacer una selección de manera adecuada, posibilitando evaluar requerimientos necesarios para su selección.

Los resultados mostraron que, es común el uso de carbón activado, vidrio sinterizado, EPU y manguera conduflex corrugada en RACA.

La matriz de comparación arrojó que, las EPU y la manguera conduflex corrugada son los dos materiales más adecuados para ser implementados en un RACA.

Referencias

De Lemos Chernicharo, C. A. (2007). *Anaerobic Reactors*. Iwa Publishing.

González, J. P. y Gómez, K. A. (2016). *Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Bojacá - Cundinamarca* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/13907>

Orozco, A. (2005). *Bioingeniería en aguas residuales. Teoría y Diseño*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental ACODAL.

- Palacios-Díaz, R. y Criado, A. M. (2016). Explicaciones acerca de fenómenos relacionados con el volumen de líquido desplazado por un sólido en inmersión, con la densidad y con la flotación, en alumnado de Educación Secundaria Obligatoria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 230-247.
- Prieto, A. y Velásquez, V. R. (2018). *Diseño, construcción y evaluación de un reactor de filtro anaerobio de flujo ascendente (Fafa) a nivel de laboratorio para el tratamiento de agua residual doméstica* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6086?show=full>
- Romero, J. A. (2005). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño* (3.^a ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sangucho, W. N. y Rodríguez, A. D. (2018). *Evaluación de la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma* [Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19452>