

**CONAMA 2024**

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

# Depuración de aguas residuales para comunidades rurales con enfoque en economía circular.

Sistema AREC-UG



# CONAMA 2024

TÍTULO

---

**Autor Principal:** Germán Cuevas Rodríguez (Universidad de Guanajuato)

**Otros autores:** Arodí Bernal Martínez (Universidad de Guanajuato); Alejandro Guadalupe Martínez Rodríguez (Universidad de Guanajuato); Fernando Huerta Martínez (Universidad de Guanajuato), Juana Beatriz Durán Vargas.

## ÍNDICE

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Metodología
5. Resultados
6. Conclusiones
7. Agradecimientos
8. Bibliografía

1. DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA COMUNIDADES RURALES CON ENFOQUE EN ECONOMÍA CIRCULAR. SISTEMA AREC-UG

2. RESUMEN

La depuración de las aguas residuales en comunidades rurales en México y países de Latinoamérica es una deuda que se tiene con las poblaciones rurales. Actualmente, a nivel mundial el 80% de las aguas residuales no se tratan, por lo que se vierten directamente al medio ocasionando impactos negativos, así como riegos ambientales y a la salud de la población (UNESCO, 2018). En este momento en México, existen alrededor de 11 millones de personas sin acceso al saneamiento (CONAGUA, 2022). Esto hace que sea necesario impulsar iniciativas para la implementación de tecnologías de bajo costo que permitan incrementar el acceso a más personas al saneamiento básico además de aprovechar y cuidar los recursos naturales con una visión de economía circular. Actualmente, la depuración de aguas residuales está impulsando iniciativas que se están enfocando en la aplicación de la economía circular con el objeto de lograr un mejor aprovechamiento de los materiales presentes en las corrientes de aguas residuales, así como obtener caudales de agua regenerada que pueda ser reutilizada en actividades que utilizan el agua, para lograr un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos y la preservación de los recursos. Es por esta razón que este proyecto tuvo como objetivo desarrollar un sistema de depuración de aguas residuales domésticas con un enfoque de economía circular para comunidades rurales y zonas urbanas sin acceso a redes de alcantarillado aplicando tecnología nacional. El proyecto se desarrolló, se instaló y se evaluó alimentado agua residual doméstica real. El sistema está constituido por un sistema de recolección del agua residual de donde se bombea hacia la alimentación con ayuda de una bomba solar. Posteriormente, el agua pasa a un biodigestor para poder darle su pretratamiento. De allí se pasa el efluente pretratado a dos sistemas de humedales, el primero es un humedal de flujo subterráneo sembrado con (*Canna indica*) y un segundo con plantas flotantes (*Lemma minor*), ambas especies

vegetales son muy apreciadas como complemento alimenticio en dieta de algunos animales o como materias primas para la elaboración de algunos productos. Posteriormente el agua tratada es filtrada y desinfectada para luego utilizarse en el riego de áreas verdes. Una de las ventajas de este proceso desarrollado es que es de bajo costo de construcción y operación, además de que hemos utilizado materiales fabricados en la región. El sistema ya ha sido operado y los resultados de depuración de las aguas residuales son buenos, ya que cumplen con las normativas mexicanas para su descarga o reutilización, tomando como base las normativas locales. Como resultado final del proyecto sea creado el diagrama de simbiosis industrial dónde se muestra el cierre del ciclo del proceso. Esta propuesta viene a contribuir al impulso de sustentabilidad que se está impulsado en el sector rural para incrementar la calidad de vida de sus habitantes, así como la preservación de los recursos del medio.

### 3. INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable no solo para el ser humano, sino para la vida en general, además de ser esencial para los diferentes procesos de todas las industrias de este planeta. Lamentablemente en los últimos años, la humanidad ha consumido varios recursos como si no hubiera un mañana, el principal de estos es el agua. Cada vez notamos más la ausencia o la falta de este esencial líquido. A pesar de esto la mayoría de las personas cuentan con malos hábitos los cuales hacen gastar más agua de la que pueden necesitar y esto pasa en todas partes casa, escuela y/o trabajo.

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la escasez de agua afecta a más del 40 % de la población mundial, una cifra alarmante que probablemente crecerá con el aumento de las temperaturas globales producto del cambio climático. La manera en la que gastamos agua diariamente provoca un desequilibrio en la regeneración de está provocando que sea cada vez más difícil la obtención de este recurso tan importante.

Aunado a esto, existen comunidades las cuales no cuentan con la tecnología ni el espacio para llevar a cabo el correcto tratamiento de las aguas residuales, por ende, sus aguas residuales terminan descargándose en cuerpos de agua cercanos a esta comunidad contaminando la flora y fauna, provocando focos de infección que generan enfermedades en la población, (ONU, 2023).

Una de las principales soluciones en las que se ha estado trabajado es el tratamiento de aguas residuales. A lo largo de los años se han propuesto varias tecnologías para el saneamiento del agua, algunas más sofisticadas y complejas que otras, aunque lamentablemente son muy caras para solventar dicha tecnología tanto con el objeto de que como en su mantenimiento. Actualmente una de las tendencias en la aplicación para llevar a cabo la depuración de las aguas residuales es la aplicación de tecnologías basadas en la naturaleza, las cuales han demostrado ser sostenibles, ya que se recuperan materiales (subproductos con alto valor agregado y aguas regeneradas), el consumo de energía es bajo, su mantenimiento es sencillo, además de que se construyen con materiales y plantas existentes en la zona. Esto da como resultado un sistema para depurar agua de manera sostenible. Es por esta razón que esta investigación tuvo como objetivo general desarrollar una solución sostenible a dicho problema implementando plantas de tratamiento residuales que sean de fácil manejo y operación , así como disminuir el uso reactivos químicos que podrían afectar a la

economía de las personas, así como una forma de implementar una visión de economía circular hacia nuestra población, para que un residuo se convierta en un recurso como se está visualizando en las nuevas plantas para tratamiento de aguas residuales, así como proteger la salud y cuidado de los recursos del medio.

#### 4. METODOLOGÍA

##### 4.1. Diseño y construcción del sistema.

El sistema de depuración se diseñó desde un inicio que fuera un sistema basado en la naturaleza para la depuración de las aguas residuales domésticas en lugares donde no existe infraestructura para su recolección, conducción y su tratamiento. El bombeo del agua residual cruda se llevó a cabo con ayuda de un bombeo impulsado con energía solar, desde el punto de generación del agua residual cruda al biodigestor, proceso dónde se le dio un pretratamiento anaerobio. Posteriormente, el efluente de agua residual pretratada fue conducido hacia un sistema de humedales flotantes, el primero constituido con una planta emergente (*Canna indica*) y el segundo constituido por una planta flotante (*Lemna minor*), mejor conocida como “Lenteja de Agua”. Después del tratamiento secundario en los humedales, el efluente tratado fue conducido a un tanque de cloración para su desinfección. En la figura 1 se muestra el diseño conceptual de la planta desarrollada con el enfoque de economía circular.

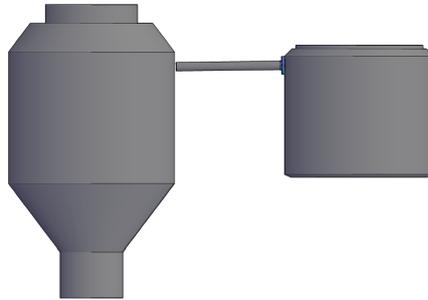


**Figura 1.** Planta piloto de aguas residuales.

El agua residual, una vez que pasó por el pretratamiento, se condujo de un tanque a otro con ayuda de la gravedad, aunque la entrada siempre es un problema ya que la mayoría de los hogares, si no es decir que todos, tienen su agua residual por debajo del suelo por lo que para que llegue al biodigestor se necesita una bomba para dirigir dicha agua hacia arriba. Lo que buscó en la planta es que sea autosustentable, para este problema se implementó una bomba solar.

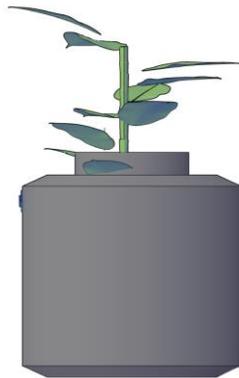
La planta de tratamiento empieza con un biodigestor, este es un sistema para el tratamiento primario de las aguas residuales domésticas, mediante un proceso de retención y degradación séptica anaerobia de la materia orgánica. El agua residual entra hasta el fondo del biodigestor donde las bacterias empiezan la descomposición del material orgánico. El agua residual pasa por el biofiltro dentro de este, donde la materia orgánica que asciende es atrapada por las bacterias fijadas en aros de un material polimérico y materiales minerales de origen volcánico, incluidos

en el biodigestor. El agua tratada finalmente sale por medio de gravedad. Los lodos generados se purgan y se depositan en un recipiente conectado a este mismo. La purga se realiza de manera intermitente.



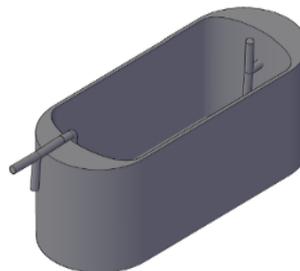
**Figura 2.** Biodigestor con su tanque para lodos.

El segundo componente consta de 3 tanques modificados en donde se instaló un contenedor con una planta ornamental (*Canna indica*) soportada con material de soporte (Tezontle) junto con un filtro de pelo de cerdo para la prevención de plagas. El material de soporte sirve como soporte de las plantas, así como para el crecimiento de biopelículas. En la figura 3 se muestra un elemento del humedal de flujo subterráneo.



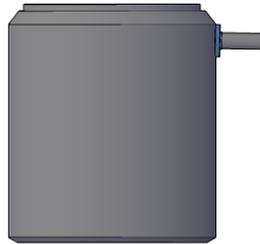
**Figura 3.** Elemento del humedal de flujo superficial.

El segundo humedal se construyó con ayuda de un tanque comercial de forma rectangular, el cual fue cubierto con una tela mosquitera para prevenir el crecimiento de plagas. Allí se utilizó la planta flotante, *Lemna minor*, la cual se caracteriza por ser una especie que puede desarrollarse en aguas residuales con baja concentración de contaminantes además de contener un alto porcentaje de proteínas. En la figura 4 se muestra el contenedor utilizado para el humedal flotante.



**Figura 4.** Contenedor utilizado como humedal flotante.

Después del tratamiento secundario en los humedales, el agua depurada se dirigió a un tanque de cloración para llevar a cabo la desinfección del agua, el cual consiste en un tanque modificado dónde se colocó un clorador convencional, en él cual se colocó una pastilla de hipoclorito de sodio para llevar a cabo la eliminación de los microorganismos patógenos. En la figura 5 se muestra el tanque clorador del sistema.



**Figura 5.** Tanque de cloración.

#### 4.2. Puesta en marcha y operación del sistema.

El sistema se construyó y operó durante un periodo continuo de tiempo, hasta lograr su maduración. El sistema se alimentó con agua residual generada en los sanitarios de la Universidad de Guanajuato (Sede "La perлита"). El sistema fue evaluado a través del seguimiento de como son pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, DQO, nitratos y fosfatos. Los métodos estándares serán utilizados para el análisis de cada parámetro. En el cuadro 1 se pueden observar los parámetros y métodos utilizados.

### 5. RESULTADOS

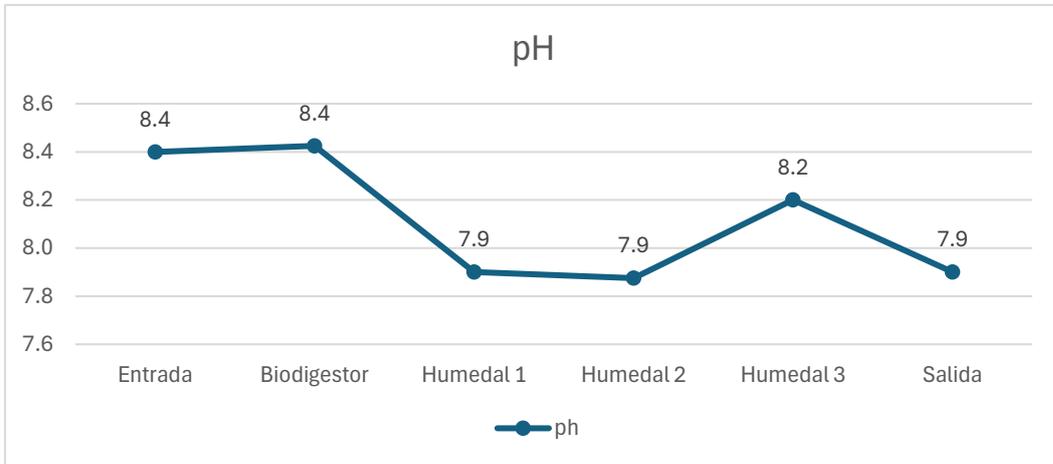
El sistema se puso en marcha y se esperó hasta obtener su maduración la cual se alcanzó después de 30 días de operación continua. Los resultados obtenidos durante el muestreo realizado en la entrada y salida en cada uno de los sistemas del sistema fueron los siguientes:

#### 5.1. pH

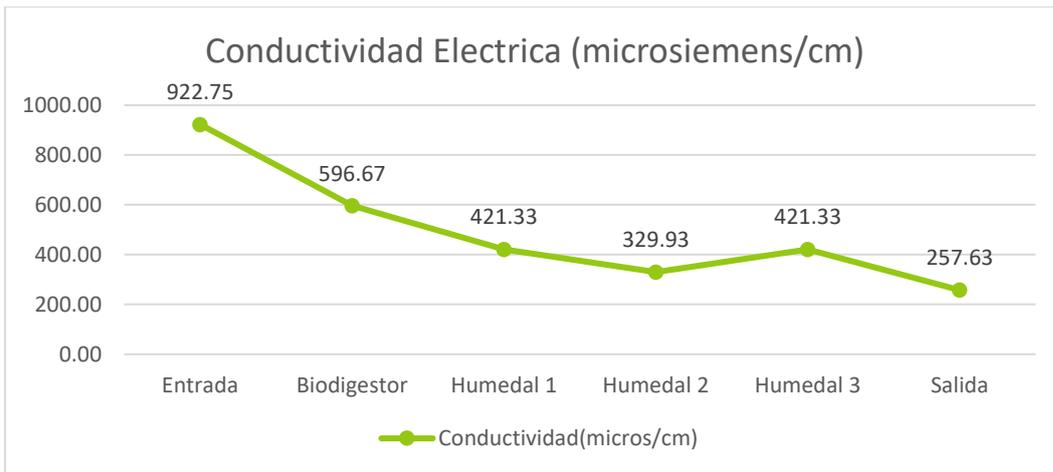
Los valores obtenidos en el efluente del reactor se muestran en la figura 6. Se observa que estuvieron variando entre 8.4 y 7.9. Estos valores de pH se encuentran dentro de lo que piden las normas mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-2021) para la disposición de agua tratada para riego en áreas verdes, el cual debe estar entre 6 y 9.

#### 5.2. Conductividad eléctrica

La conductividad hay una remoción del 72%. La mayor parte la absorbe el biodigestor y poco a poco sigue bajando hasta la salida. La conductividad eléctrica que se recomienda para el riego debe de ser menor a 800 ms/cm haciendo posible el uso del agua residual debido que el resultado de salida fue de 257.63 ms/cm. En la figura 7 se puede observar el comportamiento de este parámetro en cada uno de los puntos evaluados en el sistema.



**Figura 6.** Valores de pH detectados en los efluentes de cada etapa del proceso.



**Figura 7.** Valores de conductividad detectados en los efluentes del sistema.

### 5.3. SST

La remoción de SST alcanzados en el sistema fue de una eficiencia del 98%. Esta remoción se favoreció por la colocación del filtro que se colocó al final del tanque del humedal de plantas flotantes y el tanque de cloración, lo cual benefició la remoción de estos contaminantes, haciendo posible el cumplimiento con la norma para este parámetro, permitiendo con ello visualizar un posible reusó del efluente tratado en el riego de áreas verdes. La concentración de SST detectados fue de 2.33 mg/l al final del tratamiento. En la figura 8 se puede observar las concentraciones detectadas en cada una de las etapas.

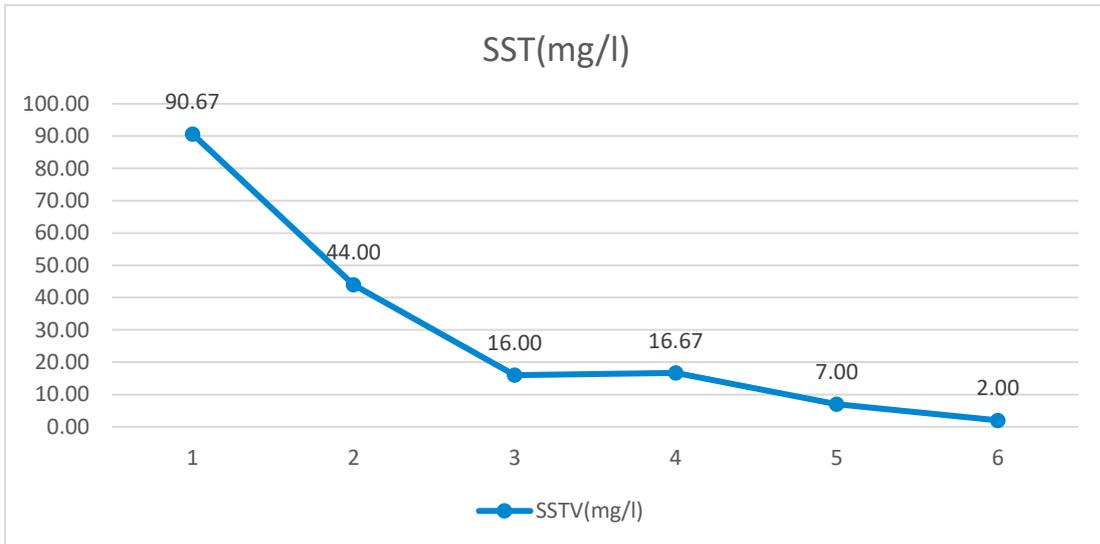


Figura 8. Concentraciones de SST detectados en cada etapa del proceso.

#### 5.4. DQO

La eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno fue del 91% detectando una concentración en el efluente final de 60 mg/L. Esta concentración de materia orgánica al final permite su empleo en el riego de áreas verde. En la figura 9 se puede observar el comportamiento de las concentraciones detectadas en cada etapa del proceso.

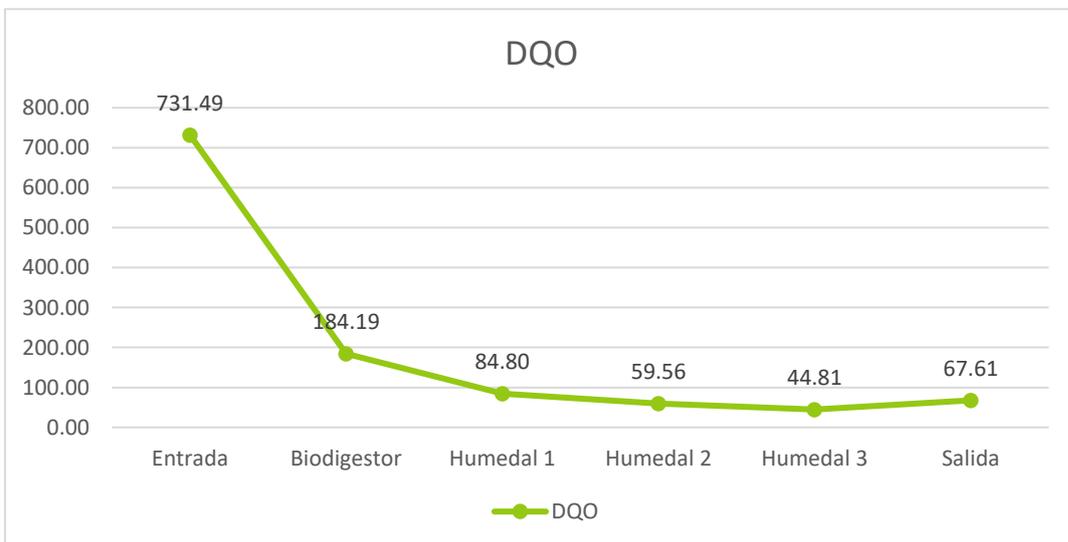


Figura 9. Concentraciones de DQO detectados en cada etapa del proceso.

#### 5.5. Nitratos (N-NO<sub>3</sub>) y Fosfatos (P-PO<sub>4</sub>)

En el sistema evaluado, la remoción de nitratos alcanzado fue de 80% y mientras que para fosfatos la remoción alcanzada fue de 66% en fosfatos. Las concentraciones de estos dos macronutrientes en el efluente de la planta fueron bajas (0.55 y 7.12 ng/L, respectivamente). Es importante mencionar que estos dos tipos de nutrientes son importantes si las aguas tratadas

son utilizadas para el riego de áreas verdes, ya que estos son benéficos para las plantas ya que sirven de nutrientes para su crecimiento. En la figura 10 se pueden observar las concentraciones detectadas en cada etapa del proceso.

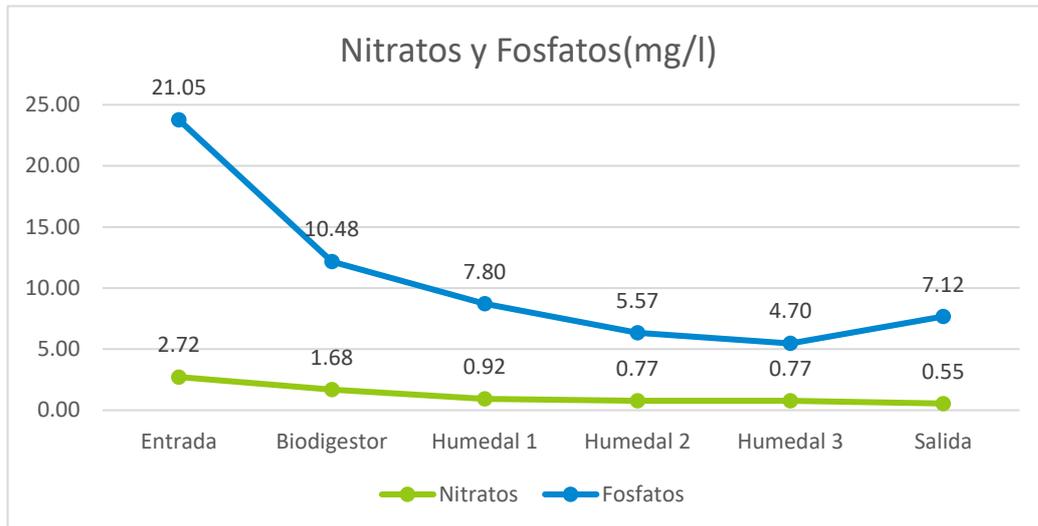


Figura 10. Concentraciones de nutrientes detectadas en cada etapa del proceso.

## 5.6. Diagrama de Simbiosis y factores diferenciadores de la tecnología.

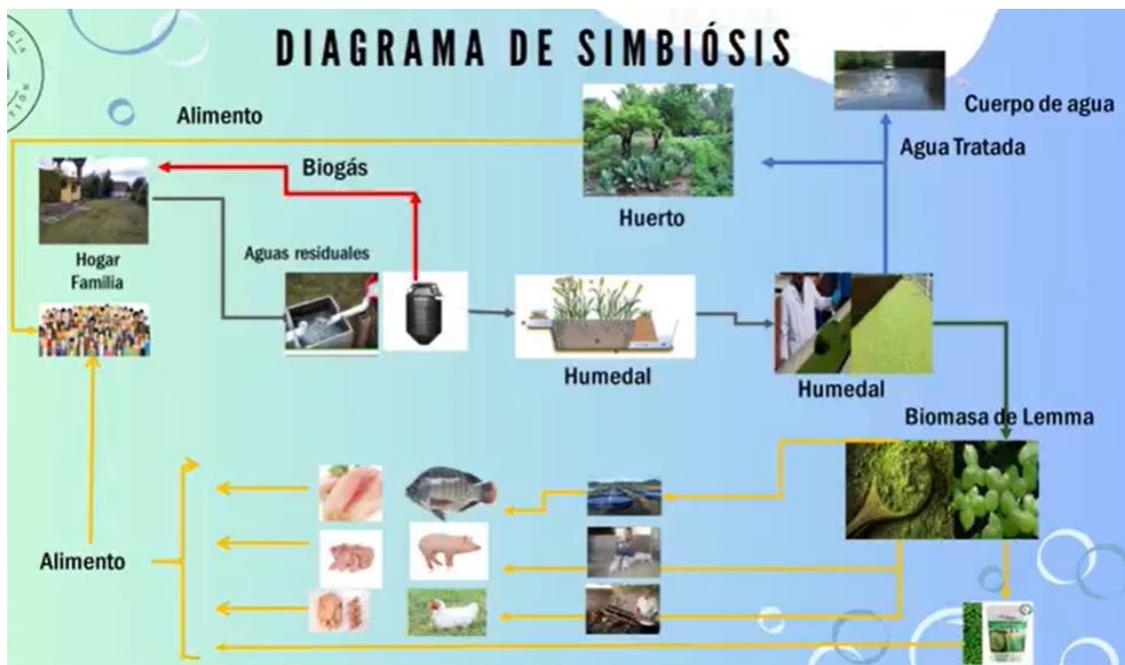


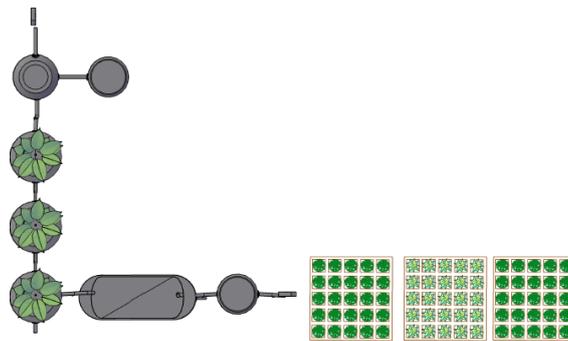
Figura 11. Diagrama de simbiosis para la integración de este nuevo sistema de PTAR.

La economía circular es una forma de concebir los procesos productivos como un sistema compatible con los recursos disponibles. Así, para asegurar la sostenibilidad de dicho sistema se

pretende aprovechar al máximo los recursos y disminuir los desechos con base en la reutilización, la reparación y el reciclaje. La circularidad permite gestionar más eficazmente los recursos y disminuir la dependencia de la economía del uso de recursos finitos, e incluso mejora la productividad y brinda resiliencia a largo plazo (Saravia,2022).

Como vemos en la imagen, nuestro sistema busca una visión de economía circular utilizando los residuos que obtenemos de nuestra planta para aprovecharlos después en otros procesos. Entre estos se encuentran dos principales, en primer lugar, tenemos el segundo humedal el cual está compuesto por la lenteja de agua (*Lemna minor*) con su porcentaje de proteína de casi 30% podemos usarlo como suplemento alimenticio en la dieta de animales domésticos como lo son gallinas, puercos, etc.

Después tenemos el agua tratada la cual puede ser utilizada para el riego de huertos y áreas verdes tomando en cuenta un sistema donde, después de su debida desinfección, siga un sistema de tuberías para llegar a diferentes parcelas y ayudar así el riego de cultivos. El diagrama propuesto se puede observar en la figura 9.



**Figura 9.** Concentraciones de DQO detectados en cada etapa del proceso.

Este nuevo modelo de planta para el tratamiento de aguas residuales se distingue por su enfoque innovador en bio-procesos y economía circular, lo que la convierte en una solución sostenible y eficiente frente a otras plantas tradicionales.

En lugar de depender exclusivamente de procesos químicos o mecánicos para tratar el agua, nuestra planta emplea bio-procesos naturales, que incluyen el uso de la planta de Lemma (comúnmente conocida como lenteja de agua), una planta acuática que tiene la capacidad de absorber nutrientes y contaminantes del agua, mejorando la calidad del efluente. Este proceso es ecológico y reduce la necesidad de productos químicos, minimizando el impacto ambiental.

Además, la integración de la economía circular es un pilar fundamental para el modelo propuesto. La planta cultivada durante el proceso de tratamiento no solo cumple con la función de purificar el agua, sino que también se cosecha y reutiliza. Este subproducto se puede utilizar como fuente de biomasa para la producción de biocombustibles, abono orgánico o como alimento para ganado, cerrando así el ciclo de los recursos y generando valor a partir de los residuos como lo propone el modelo de la economía circular.

### 6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones a las que se han llegado al final de esta propuesta es que se detecta que el sistema propuesto genera impactos positivos como son:

- **Sostenibilidad Ambiental:** La utilización de bio-procesos naturales y la reducción en el uso de productos químicos disminuyen la huella ecológica de la planta.
- **Reducción de Costos Operativos:** Al depender de procesos biológicos y reutilizar subproductos, los costos operativos se reducen a largo plazo.
- **Generación de Recursos:** La cosecha de biomasa de Lemma no solo contribuye al tratamiento del agua, sino que también genera recursos adicionales, como biomasa y abono, que pueden ser comercializados o reutilizados dentro de la cadena productiva.
- **Flexibilidad y Escalabilidad:** Este modelo se puede adaptar a diferentes escalas, desde pequeñas comunidades hasta grandes ciudades, lo que lo hace versátil y aplicable en diversas situaciones.
- **Mejora de la Calidad del Agua:** Al utilizar plantas naturales para el tratamiento, el agua tratada es de alta calidad, apta para diversos usos, como riego agrícola o incluso procesos industriales.

En resumen, el nuevo sistema que se propone de planta de tratamiento de aguas residuales no solo purifica el agua de manera eficiente, sino que también genera valor a través de la economía circular, haciendo de este sistema una alternativa verdaderamente sostenible y económica frente a los métodos tradicionales.

### 7. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato y a la Universidad de Guanajuato por los apoyos económicos y administrativos para el desarrollo del proyecto.

### 8. BIBLIOGRAFÍA

- ONU (2023). Informe de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- Saravia Matus, S., Gil Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L., & Sarmanto, N. (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe.
- HelioEsfera. (2020). Diagrama de un sistema fotovoltaico de <https://www.helioesfera.com/diagrama-sistema-fotovoltaico/>
- SEMARNAT (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

# CONAMA 2024

TÍTULO

---

## BIBLIOGRAFIA

[1] Notación bibliográfica (Normas APA)