

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA



DEL RESIDUO A LA ENERGÍA:  
GESTIÓN DEL AGUA EN PLANTA DE BIOGÁS

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD CURSO DE ESPECIALIZACIÓN

PRESENTADO POR

IRMA DAMARIS FLORES RODRÍGUEZ  
MARLENE ELIZABETH FUENTES PÉREZ

PARA OPTAR AL GRADO DE

LICENCIADA EN QUÍMICA Y FARMACIA

OCTUBRE 2025

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

MAESTRO JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL

LICENCIADO PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA

DECANA

MAESTRA NANCY ZULEYMA GONZÁLEZ SOSA

SECRETARIA

LICENCIADA EUGENIA SORTO LEMUS

DIRECCIÓN GENERAL DE PROCESOS DE GRADO

DIRECTORA GENERAL (AD-HONOREM)

MAESTRA KATIA LISSETTE MARTÍNEZ DE PALACIOS

TRIBUNAL EVALUADOR

ASESORES

ASESOR DE AREA DE MICROBIOLOGÍA

MAESTRO GUILLERMO EMILIO ALVARENGA MARROQUÍN

ASESORA

LICENCIADA MARLENE EMPERATRIZ ACOSTA MARTÍNEZ

TUTORA

LICENCIADA KATIA EUNICE LEYTON BARRIENTOS

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos, primeramente, a la Facultad de Química y Farmacia y a todos los docentes a lo largo de nuestra carrera universitaria, por todo el conocimiento transmitido.

A nuestra tutora de trabajo de grado, Lic. Katia Eunice Leyton Barrientos, por su orientación en el proyecto, su conocimiento y apoyo hasta la finalización de este trabajo.

Agradecemos profundamente al tribunal evaluador, Lic. Marlene Emperatriz Acosta Martínez y M.Sc. Guillermo Emilio Alvarenga Marroquín, por sus valiosas observaciones y sugerencias, las cuales han sido fundamentales para alcanzar un trabajo de alta calidad.

Asimismo, expresamos nuestro sincero agradecimiento al Ing. José Francisco Amaya, Director de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales STAR Nejapa, quien nos atendió y compartió generosamente todos sus conocimientos, facilitando de manera significativa el desarrollo de nuestra investigación y trabajo documental.

Irma Damaris Flores Rodríguez

Marlene Elizabeth Fuentes Pérez

## DEDICATORIA

Con gratitud y humildad, dedico el logro de graduarme y optar por mi título a quienes han sido pilares fundamentales en mi vida y en este camino académico.

A Dios, por la oportunidad de haberme permitido el privilegio de acceder a la educación, por ser guía constante y fuente de fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mis docentes, quienes con sus enseñanzas y dedicación me acompañaron en este proceso, transmitiéndome conocimientos, inspiración y admiración para crecer como profesional.

A mi mamá, mi mayor amor, ejemplo y fortaleza, cuyo cariño, sacrificios y comprensión me han formado en la mujer que soy. Dios me concedió la fortuna de ser tu hija, tu confidente y ahora también tu colega. No hay palabras que expresen lo agradecida que estoy por todo tu apoyo y por cada esfuerzo que hoy se ve reflejado en este logro.

A mis hermanas, Xiomy, quien ha estado presente en cada etapa de mi vida, acompañándome con amor en mis primeros días de colegio, universidad y trabajo, siendo siempre apoyo, protección y aliento con su nobleza; y Pamela, con quien compartí la vida universitaria, entre risas, discusiones y aprendizajes, juntas recorrimos este camino, compartiendo esfuerzos y sueños y hoy la vida nos permite vernos realizadas como profesionales.

A mi sobrino, Raúl Alejandro, mi motivación diaria y mi escape ante cualquier problema, con tus locuras llenas de alegría mi vida, me has enseñado a amar y proteger, y sobre todo, a ver la vida simple y más bonita.

A mi tía abuela, Yaya, quien con su cariño inmenso y corazón generoso siempre ha estado presente en los momentos en que más la hemos necesitado. Gracias por tu ternura y apoyo.

A mi amiga y compañera Marlene, por el apoyo, la confianza y la amistad, así como por demostrar que juntas supimos formar un gran equipo de trabajo.

Finalmente, agradezco a todos las personas que recorrieron este trayecto conmigo.

Irma Damaris Flores Rodríguez

## DEDICATORIA

Quiero aprovechar la oportunidad para expresar, llena de gratitud y amor, mi agradecimiento a aquellas personas que me han acompañado en todo este proceso

A Dios y a la Virgen María, por ser mi guía constante, por ser la luz que me ha acompañado en los momentos más oscuros y por darme la fuerza para seguir adelante cuando todo parecía complicado.

A mis padres, Medardo Fuentes y Dinora de Fuentes, y a mi hermana Karla Fuentes. Gracias por ser mi mayor apoyo, por estar siempre a mi lado, por aplaudir mis logros y darme todo lo necesario para alcanzar mis sueños. Ustedes son mi fortaleza y la razón por la que nunca dejo de luchar.

A mi abuelo, José Medardo Fuentes y a mi tía, Irma, quienes han sido mi mayor inspiración y motivación. Gracias por ser mi refugio y mi fuente de energía, por recordarme que siempre hay una razón para seguir adelante. A todos mis tíos y primos, por ser parte esencial de este proceso.

A mi abuela, Evidia Cabrera, aunque ya no esté en este mundo, sé que está muy orgullosa de mí y sé que desde donde estás, me acompañas y te alegras conmigo; gracias por todo el amor y el apoyo durante el tiempo que estuviste conmigo.

A mis queridas amigas, Yosselyn Hernández y Erita Benavides, quienes me han acompañado desde el principio, creyendo en mí en cada paso de este viaje. A Estefany Arias y Berenice Melara, mis compañeras de la carrera que se han convertido en mi familia. Gracias por no dejarme nunca sola, por ser mi pilar en los momentos buenos y malos, por compartir risas, frustraciones y logros.

A mi amiga y compañera de equipo, Damaris, por el cariño, apoyo y amistad que me has brindado. Por creer en mí y en el equipo increíble que podíamos formar juntas. Te deseo todo lo mejor en todo lo que te propongas.

Marlene Elizabeth Fuentes Pérez

## ÍNDICE GENERAL

|   | Pág. N° |
|---|---------|
| <b>RESUMEN</b>  |         |
| <b>CAPÍTULO I</b>   | 10      |
| <b>1.0 INTRODUCCIÓN</b>   | 10      |
| <b>CAPÍTULO II</b>  | 12      |
| <b>2.0 OBJETIVOS</b>  | 13      |
| <b>2.1 Objetivo General</b>                                     | 13      |
| <b>2.2 Objetivos Específicos</b>                                | 13      |
| <b>CAPÍTULO III</b>   | 14      |
| <b>3.0 MARCO TEÓRICO</b>  | 15      |
| <b>3.1 Clasificación y Características de los Tipos de Agua</b> | 15      |
| <b>3.2 Procesos y Tecnologías de Tratamiento del Agua</b>       | 17      |
| <b>3.3 Sistemas de tratamiento con producción de biogás</b>     | 18      |
| <b>CAPÍTULO IV</b>  | 27      |
| <b>4.0 PRODUCTO FINAL</b>                                       | 28      |
| <b>CAPÍTULO V</b>   | 29      |
| <b>5.0 CONCLUSIONES</b>   | 30      |
| <b>CAPÍTULO VI</b>  | 31      |
| <b>6.0 RECOMENDACIONES</b>                                      | 32      |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                               | 34      |
| <b>ANEXOS</b>   | 35      |

## ÍNDICE DE TABLAS

| <b>Tabla N°</b> |   | <b>Pág. N°</b> |
|-----------------|---|----------------|
| 1               | Parámetros normados para el control de afluente y efluente en PTAR  | 23             |
| 2               | Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del cuerpo receptor (aguas arriba y aguas abajo de la descarga STAR Nejapa) | 23             |
| 3               | Determinaciones en agua residual de entrada   | 24             |
| 4               | Determinaciones en agua residual de salida a la PTAR STAR Nejapa  | 24             |

## ÍNDICE DE ANEXOS

### **Anexo N°**

- 1 Evaluación de sólidos sedimentables mediante cono Imhoff
- 2 Visita a la PTAR STAR Nejapa con el Director de la planta

## RESUMEN

El tratamiento inadecuado de aguas residuales representa un problema ambiental crítico a nivel mundial, afectando cuerpos de agua, suelos y la salud pública. En El Salvador, gran parte de estas aguas se descarga sin tratamiento adecuado, contribuyendo significativamente a la contaminación hídrica y generando desafíos para la gestión sostenible del recurso. Frente a esta realidad, se han comenzado a explorar tecnologías sostenibles como la digestión anaerobia, que permite tratar las aguas residuales y simultáneamente producir energía renovable en forma de biogás.

En este trabajo se propuso analizar el diseño, operación, ventajas, limitaciones y marco regulatorio de las plantas de tratamiento de aguas residuales que incorporan sistemas de digestión anaerobia con generación de biogás. La metodología adoptada fue deductiva, partiendo de la clasificación de los tipos de agua y los métodos convencionales de tratamiento, para luego profundizar en los procesos anaerobios y los factores que afectan su desempeño.

Concluyendo que, estas plantas constituyen una opción técnicamente viable y ambientalmente favorable para el tratamiento de aguas residuales, además de aportar beneficios energéticos, por lo que se recomienda, difundir el conocimiento técnico relacionado con su diseño, consolidar la formación profesional en el área y dar seguimiento a los proyectos nacionales en curso, para avanzar hacia una gestión más integrada y sostenible del recurso hídrico.

## **CAPÍTULO I**

## 1.0 INTRODUCCIÓN

En El Salvador, la gestión de aguas residuales ha sido históricamente insuficiente, con descargas directas de efluentes domésticos e industriales en ríos y quebradas, provocando contaminación, afectación de la biodiversidad y riesgos para la salud de las comunidades cercanas. Esta situación evidenció la necesidad de soluciones sostenibles que respondieran tanto a las limitaciones técnicas como a los retos ambientales y sociales del país.

Entre las alternativas más prometedoras se encuentra el tratamiento anaerobio de aguas residuales con producción de biogás. Este proceso permite degradar la materia orgánica mediante microorganismos en ausencia de oxígeno y generar metano como fuente de energía. Su aplicación contribuye a reducir significativamente los contaminantes, estabilizar los lodos resultantes y generar energía renovable para uso interno o externo.

En el contexto salvadoreño, destacan diversas experiencias que ilustran la viabilidad de esta tecnología. La planta STAR en Nejapa trata aguas residuales urbanas mediante reactores anaerobios y filtros percoladores, generando biogás que se aprovecha parcialmente y produciendo lodos deshidratados que pueden ser utilizados como fertilizante. La Granja Avícola y Ganadera El Brazo, en San Miguel, utiliza digestores anaerobios para tratar aguas residuales del sector agroindustrial y emplea el biogás generado para producir vapor en calderas. Por su parte, el proyecto de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa busca integrar digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales del área metropolitana, con generación de energía eléctrica a partir del biogás producido. Estas experiencias muestran la capacidad del país para implementar tecnologías limpias y eficientes en distintos sectores.

Esta investigación, tiene como objetivo conocer el diseño, operación y beneficios de las plantas de tratamiento de aguas residuales con digestión anaerobia y producción de biogás. La investigación se desarrolló entre marzo y septiembre de 2025, aplicando un enfoque deductivo que combinó revisión documental con visitas de campo, permitiendo contrastar la teoría con la práctica y evaluar aspectos técnicos, ambientales y sociales de las plantas estudiadas.

Como producto final, se elaboró un video documental que recopila la información obtenida y genera una guía de referencia sobre el funcionamiento y la gestión de estas plantas. El estudio busca mostrar que las aguas residuales no deben considerarse un desecho, sino un recurso capaz de

generar energía, fertilizantes y mejoras en la calidad del agua, promoviendo un modelo de desarrollo sostenible y contribuyendo a la protección del ecosistema y la salud pública.

## **CAPÍTULO II**

## **2.0 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Estudiar el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales con producción de biogás.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- 2.2.1 Definir procesos y tecnologías de tratamiento del agua.
- 2.2.2 Describir el proceso de tratamiento de aguas residuales usando digestión anaerobia
- 2.2.3 Identificar las ventajas y desventajas que conlleva una planta de Biogás.
- 2.2.4 Evaluar las leyes y regulaciones de El Salvador relacionadas con el manejo de aguas residuales en Planta de Biogás.
- 2.2.5 Elaborar un video documental orientado a la divulgación del proceso de tratamiento de aguas residuales y el aprovechamiento del biogás resaltando su relevancia para el desarrollo sostenible y la producción de energía limpia.

## **CAPÍTULO III**

### 3.0 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Clasificación y Características de los Tipos de Agua

El agua puede clasificarse en función de su procedencia, características fisicoquímicas y usos, lo que facilita el entendimiento de sus propiedades, su disponibilidad y los tratamientos requeridos para su adecuada gestión y aprovechamiento responsable.

##### 3.1.1 Clasificación según la procedencia

El agua subterránea, corresponde al líquido contenido en la zona saturada del subsuelo. Su movimiento es lento, desplazándose desde áreas con mayor elevación y presión hacia regiones de menor elevación y presión, tales como ríos y lagos. En México, se han identificado 653 acuíferos para su evaluación, manejo y administración<sup>1</sup>.

El agua superficial, incluye todas las masas naturales expuestas a la atmósfera, como ríos, lagos, embalses, océanos, mares, estuarios y humedales. Estas masas pueden fluir o almacenarse en la superficie terrestre y representan una fuente vital para diversos usos<sup>1</sup>.

El agua fósil, se define como el agua subterránea que ha permanecido atrapada en formaciones geológicas, principalmente rocas sedimentarias, durante miles o millones de años desde su formación<sup>1</sup>.

##### 3.1.2 Clasificación según sus características fisicoquímicas<sup>1</sup>.

El agua destilada, es agua purificada mediante destilación, proceso que elimina completamente las sales disueltas, resultando en un líquido químicamente puro.

El agua dulce, se caracteriza por una baja concentración de sales disueltas, considerada generalmente apta para el consumo humano y la producción de agua potable.

El agua salada, contiene una concentración relativamente alta de sales minerales, típicamente alrededor de 35 gramos por litro, común en mares y océanos.

El agua salobre, presenta un contenido intermedio de sales disueltas, superior al agua dulce pero inferior al agua marina, y suele encontrarse en zonas de mezcla como estuarios, deltas o ciertos acuíferos.

El agua dura, posee elevadas concentraciones de sales, principalmente calcio y magnesio, lo que puede provocar incrustaciones en sistemas de distribución y afectar la eficiencia de detergentes.

El agua blanda, se caracteriza por una concentración muy baja de sales disueltas, usualmente menor a 0.5 partes por mil, adecuada para diversos usos industriales y domésticos.

### 3.1.3 Clasificación según sus usos<sup>1</sup>

El agua potable, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Fondo de la Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), es apta para consumo humano, higiene personal y preparación de alimentos. Se considera que existe acceso básico cuando la fuente se localiza a menos de un kilómetro del punto de uso, y acceso óptimo cuando se dispone de al menos 100 litros diarios por persona.

El agua potable salubre, cumple con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que garantizan su inocuidad para el consumo humano.

Las aguas claras o de primer uso, provienen de fuentes naturales o almacenamientos artificiales que no han sido utilizadas previamente y se conservan en condiciones adecuadas para su aprovechamiento.

Las aguas residuales, negras o servidas, son aquellas contaminadas por actividades humanas. El término “aguas negras” deriva de su coloración oscura por materia orgánica. Se distingue entre aguas servidas, de origen exclusivamente doméstico, y aguas residuales, que son mezclas de residuos domésticos e industriales. Estas aguas suelen ser conducidas por sistemas de alcantarillado y pueden incluir escorrentías pluviales e infiltraciones. Para su tratamiento, se emplean parámetros técnicos regulados por la Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Salud.

El agua estancada, es aquella que permanece acumulada en superficies impermeables o saturadas, donde la falta de pendiente impide su escurrimiento. La elevada presencia de materia orgánica y nutrientes facilita la proliferación de microorganismos anaerobios que consumen el oxígeno disuelto y generan gases como sulfuros, metano e hidrógeno, ocasionando olores característicos a putrefacción.

### **3.2 Procesos y Tecnologías de Tratamiento del Agua<sup>2</sup>.**

El tratamiento del agua comprende una variedad de procesos diseñados para mejorar su calidad y garantizar la salud pública, la protección de ecosistemas y aprovechamiento eficiente del recurso hídrico. El proceso que se aplica al agua para darle un tratamiento depende de algunos factores como la fuente de contaminación, la composición, nivel de contaminación y el uso final que se le dará al agua tratada. Los métodos aplicados pueden dividirse por etapas: primaria, secundaria y terciaria, o por el método de acción: físico, químico o biológico.

#### **3.2.1 Procesos Físicos<sup>3</sup>.**

Consisten en la separación de sólidos suspendidos y materiales flotantes sin alterar la composición química del agua; reducen la carga de contaminantes y protegen las unidades posteriores del sistema. Entre estos procesos se encuentran: rejas y tamices, sedimentación, desarenado y filtración.

#### **3.2.2 Procesos Químicos<sup>3</sup>.**

Los procesos de tratamientos químicos aplican sustancias químicas para modificar o eliminar contaminantes disueltos o coloidales y actúan sobre las sustancias que se encuentran disueltas o en suspensión mediante reacciones controladas; entre otros procesos encontramos: coagulación y floculación, neutralización, precipitación química y desinfección mediante cloro, ozono o radiación UV. La combinación de los procesos de tratamiento físicos y químicos permite cumplir con normas sanitarias y ambientales antes del vertido o la reutilización.

#### **3.2.3 Procesos Biológicos<sup>3</sup>.**

Los procesos biológicos son parte del tratamiento secundario y dicho método está basado en la capacidad para degradar la materia orgánica disuelta en el agua. Este tipo de tratamiento es comúnmente empleado en el tratamiento de aguas residuales y se encuentra subdividido en aeróbico y anaeróbico.

En la división aeróbica se encuentran sistemas de lodos activados, filtros biológicos percoladores o lagunas de estabilización, los microorganismos requieren oxígeno para descomponer los compuestos orgánicos, es muy eficiente, pero requiere energía continua y demanda de espacio.

Por otra parte, la degradación de los anaeróbicos ocurre en ausencia de oxígeno, y permite que bacterias especializadas descompongan la materia orgánica en productos como dióxido de carbono, ácidos orgánicos y metano, que es el principal componente del biogás que son aprovechados como fuente de energía.

Uno de los sistemas anaerobios más conocidos es el reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) que permite una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y genera biogás utilizable para calefacción o generación eléctrica, la aplicación es ideal en climas cálidos porque este tipo de climas favorece la actividad bacteriana. El uso de digestores anaerobios no solo reduce la carga contaminante, sino que también aporta beneficios energéticos mediante la generación de biogás.

Estos métodos ofrecen soluciones adaptadas a distintas necesidades, desde la remoción hasta desinfección final del agua tratada. La elección adecuada depende de diferentes factores como el tipo de agua. Cada tratamiento de agua tiene ventajas y desventajas, por lo que se debe evaluar las necesidades específicas para seleccionar el adecuado.

### **3.3 Sistemas de tratamiento con producción de biogás<sup>3</sup>**

El tratamiento de aguas residuales usando digestión anaerobia se ha vuelto una opción muy efectiva para reducir la contaminación y al mismo tiempo, generar energía renovable en forma de biogás.

El biogás, generado a partir de materia orgánica mediante digestión anaeróbica (DA), está cobrando importancia como fuente de energía renovable a nivel mundial. La DA es un proceso bioquímico en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando energía y subproductos como el biogás (principalmente metano y dióxido de carbono). Este proceso consta de cuatro etapas principales:

- Hidrólisis, en la que se descomponen compuestos orgánicos complejos en moléculas más simples como aminoácidos, ácidos grasos y azúcares;
- Acidogénesis fermentativa, donde las bacterias convierten estas moléculas en ácidos orgánicos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono;
- Acetogénesis, etapa en la cual los ácidos orgánicos y alcoholes se transforman aún más en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por acción de bacterias acetogénicas; y

-Metanogénesis, que consiste en la conversión de ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono adicional por parte de arqueas metanogénicas, completando así el proceso.

Esta tecnología combina principios de ingeniería sanitaria y microbiología ambiental, y está muy alineada con las ideas actuales de economía circular y sostenibilidad energética. Para aplicarla correctamente, es necesario entender bien los procesos biológicos que intervienen, los tipos de tecnologías que se usan, sus impactos ambientales y también las regulaciones que existen para su implementación.

Estas etapas han sido estudiadas tanto en laboratorios como en plantas industriales. Se mostró que, para producir biogás a partir de una mezcla de aguas residuales y residuos agrícolas, la relación carbono/nitrógeno (C/N) es clave y debe estar entre 20 y 30 para que el metano se produzca de forma óptima. En ese estudio, la mezcla con una relación C/N de 23.8 tuvo mejor rendimiento que otra con un valor de 13.7.

### 3.3.1 Tipos de configuración en plantas con sistemas anaerobios

La configuración en plantas con sistemas anaerobios hace referencia a la forma en que se organizan y disponen los reactores donde ocurre la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Esta organización es fundamental, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso, la estabilidad de los consorcios microbianos y la cantidad de biogás generado. Dependiendo de cómo se integren las distintas fases de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), las configuraciones pueden variar desde esquemas sencillos de una sola etapa hasta sistemas más complejos que dividen el proceso en varios reactores especializados. La elección de la configuración adecuada está determinada por las características de la materia prima, las condiciones de operación y los objetivos de la planta, orientándose siempre a optimizar la producción energética y la reducción de contaminantes<sup>4</sup>.

#### 3.3.1.1 Biodigestores tipo Batch.

Estos biodigestores se realizan de forma discontinua, se cierra el sistema y se deja que la digestión ocurre durante un tiempo determinado, no se agrega ni retira material hasta que termina el ciclo<sup>5</sup>.

#### -Sistemas de una etapa

Estos sistemas, reúnen las cuatro fases del proceso anaerobio (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) dentro de un solo reactor. Esto significa que todas las reacciones ocurren en el mismo espacio al mismo tiempo<sup>6</sup>.

#### -Sistemas multietapa

Dividen el proceso en diferentes reactores, separando etapas como la hidrólisis y la metanogénesis. Cada reactor está diseñado para condiciones específicas que favorecen la actividad de los microorganismos en esa fase, mejorando la eficiencia general del proceso<sup>6</sup>.

Al diseñar una planta para producir biogás, hay que tener en cuenta varias variables importantes, como la temperatura (mesófila o termófila), el pH ideal (entre 6.8 y 7.2), el tiempo que tarda el agua en pasar por el sistema (TRH), la relación C/N y la disponibilidad de materia prima. Además, el pretratamiento de residuos (ya sea mecánico, térmico, químico o biológico) puede acelerar la digestión y aumentar la cantidad de gas generado<sup>5</sup>.

### 3.3.2 Principales plantas de producción de biogás en El Salvador<sup>7</sup>

En los últimos años ha habido un notable interés en El Salvador, para incentivar la producción de energías limpias y renovables, las que representan ya un 70 % de la matriz energética del país, según cifras oficiales.

Como ejemplo representativo, se encuentran las plantas de producción de biogás que permiten identificar diversas iniciativas que han incorporado tecnologías de digestión anaerobia para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos, tanto en el sector agroindustrial como en el tratamiento de aguas residuales. A continuación, se describen algunas de las principales experiencias desarrolladas en el país.

#### 3.3.2.1 Granja Avícola y Ganadera El Brazo, San Miguel<sup>8</sup>

Esta planta pertenece al Grupo Campestre y constituye uno de los casos más destacados en el ámbito agroindustrial. En esta instalación se realiza el tratamiento de aguas residuales generadas por actividades avícolas y ganaderas mediante digestores anaerobios. El biogás producido, con un volumen aproximado de 24,000 m<sup>3</sup> mensuales, se emplea para alimentar calderas y generar vapor, sustituyendo así el uso de combustibles fósiles. Por otra parte, además del aprovechamiento

energético, se obtiene como subproducto un lodo digerido que es utilizado como fertilizante agrícola, promoviendo un modelo de economía circular.

### 3.3.2.2 Proyecto de planta de generación eléctrica con biogás, Río Acelhuate (CEL)<sup>7</sup>

Este proyecto, impulsado por la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), contempla la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales que cubrirá aproximadamente el 70 % del caudal generado por el Área Metropolitana de San Salvador. La instalación incluirá digestores anaerobios para la producción de biogás, con una capacidad estimada de generación de energía eléctrica de hasta 1.7 MW. El sistema se complementará con módulos fotovoltaicos y tecnología hidroeléctrica, contribuyendo así a la diversificación de la matriz energética del país mediante fuentes renovables.

### 3.3.2.3 Planta AES Nejapa (San Salvador)<sup>9</sup>

La planta de AES Nejapa, si bien no trata aguas residuales, es una instalación relevante en el contexto de la producción de biogás en el país. Su funcionamiento se basa en la captación de biogás generado en un relleno sanitario a partir de la descomposición de residuos sólidos urbanos. La energía generada alcanza una potencia de aproximadamente 6 MW, la cual es inyectada al sistema eléctrico nacional. Este proyecto representa una solución sostenible para el manejo de residuos y un ejemplo exitoso de aprovechamiento energético de desechos orgánicos.

### 3.3.2.4 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales STAR, Nejapa<sup>10</sup>

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) STAR ubicada en Nejapa, inició operaciones en enero de 2023 tras un período de planificación superior a diez años y con una inversión aproximada de cinco millones de dólares, financiada mediante la alianza entre FOMILENIO II y la empresa privada. Esta infraestructura tiene como propósito el tratamiento de aguas residuales provenientes de zonas residenciales urbanas y periurbanas, así como del sector industrial y logístico del municipio.

El sistema implementa un tratamiento combinado que integra reactores anaerobios y filtros percoladores, lo que permite una remoción más eficiente de la carga contaminante. Inicialmente, el agua residual ingresa a los reactores anaerobios, donde microorganismos descomponen la

materia orgánica y generan biogás como subproducto. Posteriormente, el efluente se dirige a los filtros percoladores conformados por material plástico tipo rosetón, en el cual se desarrolla una biopelícula bacteriana encargada de completar el proceso de depuración. La línea de tratamiento se complementa con una cámara de recirculación, que asegura la mezcla hidráulica y la redistribución parcial del caudal hacia los reactores, mientras el flujo principal avanza hacia la cascada de salida para su oxigenación natural previa a la descarga en el río San Antonio.

Con el incremento progresivo de conexiones, se implementó un tanque de retención que actúa como sistema regulador hidráulico. Dicho tanque almacena temporalmente excedentes durante periodos de alta carga, especialmente en época lluviosa, evitando la sobrecarga hidráulica del sistema y asegurando la estabilidad del tratamiento.

En relación con los residuos generados, la planta produce lodos que son trasladados a lechos de secado conformados por capas de arena y grava. Una vez deshidratados y compactados, estos lodos pueden tener aprovechamiento agrícola o ser destinados como material de relleno, siempre y cuando cumplan con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos establecidos en la normativa vigente; de no ser así, deben ser entregados a gestores autorizados.

El control de calidad del afluente, efluente y del cuerpo receptor se realiza mediante muestreos periódicos, siguiendo el Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.05.01:18 y las metodologías de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* correspondientes a la 24ª edición, publicada en 2022. En el afluente se evalúan la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos, mientras que en el efluente se incluyen además grasas, aceites y coliformes fecales. Para el cuerpo receptor, la normativa no define parámetros específicos, por lo que la planta utiliza como referencia el Índice de Calidad del Agua (ICA). Esta información se reporta periódicamente en el Sistema de Evaluación Ambiental (SEA) del MARN.

El control de los parámetros básicos en el afluente y efluente de la planta es necesario para dar cumplimiento a la normativa ambiental salvadoreña RTS 13.05.01:18. Dichos parámetros incluyen caudal, sólidos sedimentables y pH, los cuales permiten un seguimiento adecuado del desempeño de la planta de tratamiento (Ver Tabla N° 1).

**Tabla N° 1.** Parámetros normados para el control de afluente y efluente en PTAR

| Parámetro                   | Limite permisible | Aplica para         |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| Caudal                      | No especificado   | Afluente            |
| Solidos sedimentables       | 1 ml/L            | Efluente            |
| Potencial de Hidrogeno (pH) | 6.0-9.0           | Afluente y Efluente |

Fuente: Elaboración propia con base en<sup>11</sup>

La evaluación del cuerpo receptor requiere la determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que permiten valorar el impacto ambiental de las descargas de la planta. Para este fin se consideran los valores establecidos en la normativa RTS 13.05.01:18 y las metodologías estandarizadas en *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24.<sup>a</sup> ed. (Ver Tabla N° 2).

**Tabla N° 2.** Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del cuerpo receptor

| Determinación                        | Norma RTS 13.05.01:18<br>Agua. Aguas residuales | Referencia:<br>Standar Methods for the examination of water<br>Wasterwater, 24 <sup>th</sup> edition, 2022 |
|--------------------------------------|---|--|
| Fosfatos                             | Sin rango definido                              | 4500-PE  |
| Nitratos                             | Sin rango definido                              | 4500-NO3-B   |
| Solidos disueltos                    | Sin rango definido                              | 2540-C   |
| pH in situ                           | 6-9   | 4500-H+  |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)  | 60 mg/L   | 5210-B   |
| Oxígeno Disuelto                     | Sin rango definido                              | 4500-O G   |
| Turbidez                             | Sin rango definido                              | 2130-B   |
| Temperatura in situ                  | 20-35°C   | 2550-B   |
| Coliformes Fecales (Termotolerantes) | Sin rango definido                              | 9221E  |

Fuente: Elaboración propia con base en<sup>11,12</sup>

Con el propósito de caracterizar el agua residual que ingresa a la planta, se determinan parámetros de control que permiten establecer la carga contaminante afluente. Estos valores se encuentran normados por el RTS 13.05.01:18 y constituyen la base para la evaluación de la eficiencia del sistema (Ver Tabla N° 3).

**Tabla N° 3.** Determinaciones en agua residual de entrada a la PTAR STAR Nejapa

| <b>Determinación</b>                | <b>Norma RTS 13.05.01:18<br/>Agua. Aguas residuales</b> | <b>Referencia:<br/>Standar Methods for the examination<br/>of water Wasterwater, 24<sup>th</sup> edition,<br/>2022</b> |
|-------------------------------------|---|--|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) | 60 mg/L   | 5210-B   |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)    | 150 mg/L  | 5220-D   |
| Solidos Suspendidos                 | 60 mg/L   | 2540-D   |

Fuente: Elaboración propia con base en<sup>11,12</sup>

Previo a la descarga del efluente tratado, es obligatorio verificar parámetros adicionales que permitan confirmar la eficiencia del proceso de depuración y el cumplimiento de la normativa ambiental. Las determinaciones se rigen por la RTS 13.05.01:18 y métodos estandarizados internacionales (Ver Tabla N° 4).

**Tabla N° 4.** Determinaciones en agua residual de salida a la PTAR STAR Nejapa

| <b>Determinación</b>                       | <b>Norma. RTS 13.05.01:18<br/>Agua. Aguas residuales</b> | <b>Referencia:<br/>Standar Methods for the examination of<br/>water Wasterwater, 24<sup>th</sup> edition, 2022</b> |
|--|--|--|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)        | 60 mg/L  | 5210-B   |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)           | 150 mg/L   | 5220-D   |
| Solidos Suspendidos                        | 60 mg/L  | 2540-D   |
| Grasas y Aceites                           | 20 mg/L  | 5520-B   |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno SAA | Sin rango definido                                       | 5540-C   |
| Coliformes Fecales (Termotolerantes)       | Sin rango definido                                       | 9221E  |

Fuente: Elaboración propia con base en<sup>11,12</sup>

En el ámbito de la gestión económica y administrativa, la PTAR STAR opera bajo un modelo de sostenibilidad financiera mediante el cobro de una tarifa diferenciada: una cuota fija mensual a los usuarios residenciales y un cargo proporcional al volumen descargado para el sector empresarial.

El esquema de gobernanza está conformado como entidad municipal descentralizada, administrada por una junta directiva con representación municipal, empresarial, residencial y comunitaria, lo cual asegura autonomía operativa y estabilidad en el tiempo.

### 3.3.3 Ventajas y desventajas de tratamiento con producción de biogás<sup>3</sup>

El tratamiento de aguas residuales mediante digestión anaerobia representa una tecnología avanzada que combina la depuración de efluentes con la generación de energía renovable. Entre sus principales ventajas técnicas y operativas destacan:

-Producción de biogás con alto contenido energético: El metano generado constituye un combustible renovable que puede ser aprovechado para la generación de calor, vapor o energía eléctrica, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y favoreciendo la eficiencia energética de la planta.

-Generación de digestato aprovechable: Los lodos digeridos presentan una reducción de patógenos y estabilidad química relativa, pudiendo ser aplicados como fertilizante en suelos agrícolas tras cumplir con criterios fisicoquímicos y microbiológicos, contribuyendo a la economía circular.

-Minimización de impactos ambientales: La reducción de sólidos, compuestos nitrogenados y materia orgánica disminuye la carga contaminante vertida a cuerpos receptores, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua superficial y a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

-Adaptabilidad a diferentes escalas y condiciones: Los sistemas pueden configurarse en reactores de una o varias etapas, batch o continuo, permitiendo su aplicación tanto en plantas urbanas como en instalaciones agroindustriales, optimizando el rendimiento según las características de los residuos y el clima (mesófilo o termófilo).

A pesar de estas ventajas, la implementación de digestión anaerobia enfrenta limitaciones técnicas y operativas importantes:

-Sensibilidad a la composición del afluente: Cambios abruptos en el contenido de materia orgánica, presencia de inhibidores químicos (metales pesados, detergentes, antibióticos) o variaciones en la relación carbono/nitrógeno pueden afectar la actividad microbiana, disminuyendo la eficiencia del proceso y la producción de biogás.

-Control riguroso de parámetros operativos: La eficiencia depende del mantenimiento de condiciones estrictas de temperatura, pH, tiempo de retención hidráulico y mezcla homogénea, requiriendo sistemas de monitoreo y personal técnico altamente capacitado.

-Inversión y costos operativos elevados: La construcción de reactores, sistemas de calefacción, agitación y control automatizado implica altos costos iniciales y mantenimiento especializado, lo que puede limitar la viabilidad en comunidades de recursos restringidos.

### 3.3.4 Marco legal y regulaciones aplicables a las plantas de biogás en El Salvador

En El Salvador, la instalación y operación de plantas de biogás se encuentra regida por un marco legal general, aunque aún no existe una normativa específica que detalle los parámetros operativos y de monitoreo de estos sistemas. Entre las principales leyes y regulaciones aplicables se incluyen:

-Ley General de Recursos Hídricos (Decreto No. 59/2021): Promueve el uso sostenible del agua y regula la descarga de efluentes, estableciendo criterios generales de protección hídrica.

-Ley del Medio Ambiente (Decreto No. 233/1998): Exige la obtención de permisos ambientales para la construcción y operación de instalaciones que puedan impactar al entorno, incluyendo estudios de impacto ambiental y planes de manejo de residuos.

-Reglamento Técnico de Vertidos: Establece límites para parámetros como DBO, DQO, sólidos suspendidos y patógenos en aguas residuales, aunque no define con precisión los indicadores a medir en el cuerpo receptor ni los criterios específicos para la disposición de lodos.

-Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.05.01:18 Agua. Aguas residuales: Regula el muestreo y análisis periódico del afluente y efluente, incluyendo parámetros como DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, grasas, aceites y coliformes fecales, asegurando la eficiencia del tratamiento y el cumplimiento de límites normativos. También establece la necesidad de una caracterización anual de los lodos generados, aunque la normativa no especifica con exactitud los parámetros que estos deben cumplir para su disposición o aprovechamiento.

-Sistema de Evaluación Ambiental (SEA) del MARN: Permite el registro y monitoreo periódico de los resultados fisicoquímicos y microbiológicos, asegurando la trazabilidad y el cumplimiento de los requerimientos regulatorios.

## **CAPÍTULO IV**

## 4.0 PRODUCTO FINAL

El producto final, es un video documental que explica de forma clara y comprensible, cómo funciona el proceso de digestión anaerobia y como, a partir de este, es posible tratar aguas residuales y generar energía al mismo tiempo. Adicionalmente, se muestran los distintos tipos de sistemas que existen, los beneficios que ofrecen, las condiciones técnicas que requieren y también algunas de sus limitaciones, con el fin de brindar una visión completa sobre esta tecnología.

El objetivo del documental no es solo informar, sino también crear conciencia sobre la importancia de tratar adecuadamente las aguas residuales y sobre el potencial que tiene el biogás como fuente de energía. Con esto, se espera aportar al conocimiento colectivo y motivar el interés por soluciones que favorezcan al medio ambiente y a la sociedad.

Dar clic en el siguiente enlace:

<https://youtu.be/m7Oxr9N65VQ>

## **CAPÍTULO V**

## 5.0 CONCLUSIONES

1. Los procesos físicos, químicos y biológicos aplicados en las Plantas de tratamiento de aguas residuales, permiten reducir sólidos, contaminantes disueltos y materia orgánica. La combinación de estos procesos asegura la calidad del efluente y la protección de los ecosistemas.
2. La digestión anaerobia constituye un proceso clave en la reducción de la carga contaminante de las aguas residuales a través de las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, se logra transformar la materia orgánica en biogás, lo que permite generar energía eléctrica de forma ambientalmente sostenible y aprovechar los desechos biológicos para beneficio del entorno y las comunidades.
3. Las plantas de biogás presentan ventajas claras, como la reducción de materia orgánica, la generación de energía renovable y la producción de digestato con potencial agrícola. Sin embargo, requieren control estricto de variables operativas, personal técnico capacitado y planificación frente a variaciones en los residuos. Además, se requiere profundizar en la investigación de los parámetros fisicoquímicos que deben cumplir los lodos para su disposición o uso seguro.
4. Aunque existe un marco legal básico (Ley General de Recursos Hídricos, Ley del Medio Ambiente y Reglamento Técnico de Vertidos), no hay una normativa específica que guíe la instalación y operación de plantas de biogás ni que defina parámetros claros para medir la calidad del cuerpo receptor y los lodos. Esto evidencia la necesidad de desarrollar regulaciones más precisas que fortalezcan la seguridad ambiental y jurídica de estas instalaciones.
5. La experiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR STAR demuestra que la implementación de tecnologías adecuadas, junto con un financiamiento sostenible y el respaldo de un marco regulatorio sólido, permite alcanzar una operación eficiente y continua. Este modelo constituye una alternativa viable para replicarse en otros sistemas de tratamiento y en cuerpos receptores de mayor magnitud en El Salvador.

## **CAPÍTULO VI**

## 6.0 RECOMENDACIONES

1. Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, desarrollar una normativa técnica específica para la instalación y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales con digestión anaerobia y producción de biogás, incluyendo parámetros de monitoreo para el cuerpo receptor y los lodos generados.
2. Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, fortalecer la vigilancia y seguimiento de las plantas existentes y en construcción, asegurando el cumplimiento de estándares de eficiencia en la reducción de carga contaminante y generación de biogás.
3. A las instituciones educativas técnicas y de nivel superior, incorporar investigaciones sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, generación de biogás y manejo de residuos, para formar profesionales capacitados en la operación y diseño de estas tecnologías.
4. A las municipalidades, evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar sistemas de digestión anaerobia en sus plantas locales de tratamiento de aguas residuales, considerando los beneficios ambientales y la producción de energía renovable.
5. A los organismos de financiamiento y cooperación internacional, apoyar proyectos piloto de tratamiento de aguas residuales con producción de biogás en zonas rurales o comunidades vulnerables, fomentando la sostenibilidad ambiental, energética y social.
6. Se recomienda a la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) establecer un parámetro microbiológico específico para evaluar la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales, utilizando los coliformes fecales como indicador. Este parámetro debe reflejar una reducción significativa respecto al afluente, asegurando que el efluente cumpla con los niveles adecuados antes de su vertido al cuerpo receptor, en concordancia con la Norma Salvadoreña; así como la actualización periódica de los lineamientos técnicos aplicables al monitoreo y control de la calidad del agua, fomentando el conocimiento y la especialización en parámetros microbiológicos por parte del personal responsable del saneamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agua.org.mx [Internet]. Ciudad de México: Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.; 2004 [citado 2025 Jul 24]. Tipos de agua. Disponible en: <https://agua.org.mx/que-es/>
2. Gómez EB. Técnicas y métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas residuales. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/ BCN. el 5 de julio de 2018;1–3. [citado el 18 de julio de 2025].
3. Grupo Acura. Sistemas de tratamiento de aguas: beneficios, procesos, equipos y tipologías [Internet]. Grupo Acura. 2021 [citado el 18 de julio de 2025]. Disponible en: <https://grupoacura.com/es/blog/sistemas-de-tratamiento-de-aguas/>
4. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery [Libro]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2014.
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [Internet]. Roma: FAO; 2008 [citado 2025 Oct 2]. Producción de biogás: Manual práctico. Disponible en: <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
6. Appropedia [Internet]. California: Appropedia Foundation; 2024 [citado 2025 Oct 2]. Anaerobic digestion. Disponible en: [https://www.appropedia.org/Anaerobic\\_digestion/es](https://www.appropedia.org/Anaerobic_digestion/es)
7. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL). La Planta de Biogás en el río Acelhuate sigue avanzando [Internet]. San Salvador: CEL; 2022 [citado 2025 Oct 2]. Disponible en: <https://www.cel.gob.sv/la-planta-de-biogas-en-el-rio-acelhuate-sigue-avanzando/>
8. IICA. Producción de biogás, Granja Avícola El Brazo, El Salvador [Internet]. San Salvador: IICA; 2024 [citado 2025 Oct 2]. Disponible en: <https://bio-emprender.iica.int/iica-club/produccion-de-biogas-granja-avicola-el-brazo-el-salvador/>
9. AES El Salvador. Planta Nejapa [Internet]. San Salvador: AES El Salvador; 2024 [citado 2025 Oct 2]. Disponible en: <https://www.aes-elsalvador.com/es/planta-nejapa>
10. Amaya F. Entrevista sobre operación y producción de biogás en la planta Star Nejapa [Entrevista]. San Salvador; 2025 Jul 26.
11. Ministerio de Salud y Asistencia Social, El Salvador. RTS 13.05.01:18. Requisitos Técnicos Sanitarios para plantas de tratamiento de aguas residuales. San Salvador: MINSAL; 2018.

12. Eaton AD, Clesceri LS, Rice EW, Greenberg AE, editors. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24th ed. Washington, DC: American Public Health Association; 2017.

## **ANEXOS**

## ANEXO N°1



**Figura N°1.** Evaluación de sólidos sedimentables mediante cono Imhoff  
Fuente: Elaboración propia

## ANEXO N°2



**Figura N°1.** Visita a la PTAR STAR Nejava con el Director de la planta  
Fuente: Elaboración propia