

## ***Viabilidad para implementar la economía circular en planta de tratamiento de aguas residuales de Cusco***

*Feasibility of implementing the circular economy in Cusco's wastewater treatment plant*

*Viabilidade da implementação da economia circular na estação de tratamento de águas residuais de Cusco*

**César Paniagua Chacón**

cesarpaniagua2000@yahoo.es

<https://orcid.org/0009-0008-9037-9822>

**Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Perú**

**Maribel Canchari Medina**

mmarimedina@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6000-428X>

**Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho, Perú**

**Carlos Alberto Villafuerte Alvarez**

villafuertealvarezc@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8786-077X>

**Universidad Cesar Vallejo, Lima Perú**

<http://doi.org/10.59659/impulso.v.5i10.124>

Artículo recibido 18 de febrero 2024 | Aceptado 24 de marzo 2025 | Publicado 3 de abril 2025

### **RESUMEN**

Poner en marcha la economía circular en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales permite la recuperación y reutilización de recursos como agua y nutrientes, transformándola de un centro de costos, a uno que genera valor económico y ambiental. Es por ello que se planteó analizar su implementación en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales-PTAR de San Jerónimo de Cusco, evaluando su viabilidad económica, ambiental y operativa. La metodología se fundamentó en un enfoque cualitativo de nivel descriptivo-correlacional y diseño de campo con la realización de entrevistas a 6 trabajadores de la planta seleccionados por un muestreo intencional. Los resultados apuntaron a que el éxito del proyecto radica en el desarrollo de estrategias que optimicen el reaprovechamiento de recursos, mejoren la eficiencia operativa y reduzcan los impactos ambientales, por tanto, se propone optimizar la infraestructura tecnológica de la PTAR enfatizando en la transformación y valorización de biosólidos y biogás.

**Palabras clave:** Viabilidad; Economía Circular; Planta de Tratamiento de Aguas Residuales; Sostenibilidad; Economía Regenerativa

### **ABSTRACT**

Implementing the circular economy in a Wastewater Treatment Plant allows the recovery and reuse of resources such as water and nutrients, transforming it from a cost center to one that generates economic and environmental value. For this reason, it was proposed to analyze its implementation in the San Jeronimo de Cusco Wastewater Treatment Plant (WWTP), evaluating its economic, environmental and operational feasibility. The methodology was based on a qualitative approach of descriptive-correlational level and field design with interviews to 6 workers of the plant selected by a purposive sampling. The results showed that the success of the project lies in the development of strategies that optimize the reuse of resources, improve operational efficiency and reduce environmental impacts, therefore, it is proposed to optimize the technological infrastructure of the WWTP emphasizing the transformation and valorization of biosolids and biogas.

**Keywords:** Feasibility; Circular Economy; Wastewater Treatment Plant; Sustainability; Regenerative Economy

## RESUMO

A implementação da economia circular em uma Estação de Tratamento de Águas Residuais permite a recuperação e a reutilização de recursos como água e nutrientes, transformando-a de um centro de custos em um centro gerador de valor econômico e ambiental. Por isso, foi proposto analisar sua implementação na Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de San Jerónimo de Cusco, avaliando sua viabilidade econômica, ambiental e operacional. A metodologia baseou-se em uma abordagem qualitativa em nível descritivo-correlacional e em um projeto de campo com entrevistas com 6 trabalhadores da estação selecionados por amostragem intencional. Os resultados mostraram que o sucesso do projeto está no desenvolvimento de estratégias que otimizem a reutilização de recursos, melhorem a eficiência operacional e reduzam os impactos ambientais, portanto, propõe-se otimizar a infraestrutura tecnológica da ETAR, enfatizando a transformação e a valorização de biosólidos e biogás.

**Palavras chave:** Viabilidade; Economia Circular; Estação de Tratamento de Águas Residuais; Sustentabilidade; Economia Regenerativa

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales a nivel mundial revelan una verdadera problemática ambiental cuando estas no pasan por un proceso de tratamiento y son vertidas de manera indiscriminada a los cuerpos receptores, de manera medular por el incremento de la población y el acelerado aumento de las urbanizaciones del planeta, quienes sin duda fueron generando una masiva producción de aguas residuales domésticas, esto en virtud que se tiene por ejemplo que para el 2020 alrededor del 80 % de las aguas residuales producidas universalmente, son proporcionadas sin antes previamente pasar por un tratamiento, perjudicando directamente el medio ambiente (Rodríguez et al. 2019).

Se tiene el caso de que en América latina es posible evidenciar una problemática análoga en razón de que el 80% de las poblaciones urbanas generan aguas residuales que no pasan por un proceso de tratamiento antes de ser vertidas al medio ambiente en aproximadamente un 70%, aumentando con ello una serie de riesgos para el bienestar colectivo y la preservación del medio ambiente (Larios, González y Morales 2016).

De las emisiones producidas por las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales-PTAR de forma global, el 5% de las emisiones de metano son a causa de dichas instalaciones y se esperan que para el 2030 se incrementen hasta un 28%, siendo una problemática a futuro que puede verse como oportunidad para generar nuevos recursos mediante la recuperación y reutilización de los recursos obtenidos en el procedimiento de depuración, en las que la energía puede ser un recurso proveniente de las aguas residuales y que reduzcan las emisiones y promuevan la autosuficiencia energética en las PTAR, minimizando los costos de saneamiento y ser un servicio autosostenible (Rodríguez et al. 2019); (Benitez y Blanco 2020).

Frente a esta problemática que aqueja al mundo y América Latina, en un futuro es menester que se considere seguir los principios de la economía circular, tomando como punto de partida del desarrollo urbano que necesita enfoques para que pueda mermar el uso de recursos y la recuperación de los que ya fueron empleados; ponderando a las aguas residuales como un recurso vital mediante el cual es posible

recuperar energía y los nutrientes que contiene, además también de considerarse como una fuente adicional de agua (Rodríguez D., Serrano H., Delgado A., Nolasco y Saltiel 2019).

Hoy en día las aguas residuales pueden ser tratadas hasta lograr una buena calidad para satisfacer demandas de sectores como la industria y agricultura, además de que el aprovechamiento de los productos secundarios del tratamiento se puede transformar en elementos valiosos para la agricultura y generación de energía; este aprovechamiento ya sean en agua reutilizable, Biosólidos, energía o nutrientes, representan beneficios en relación a la sostenibilidad económica de los sistemas de saneamiento (Rodríguez et al. 2019).

Uno de los productos secundarios del tratamiento, es el biogás, el cual deriva del tratamiento de aguas residuales que medularmente está constituido por metano, tiene una variedad de aplicaciones debido a sus propiedades. La conversión de energía química en energía eléctrica, térmica o ambas facilita su aprovechamiento como, por ejemplo, para generar electricidad, para autoconsumo en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Asimismo, para calentar los digestores de lodos, para maximizar la eficiencia de la digestión anaerobia, además para secar y disminuir el volumen de los lodos procesados antes de su disposición final, de igual manera se pueden emplear como combustibles industriales, residenciales o hasta vehiculares (Hernández et al. 2017).

A través del empleo del biogás, los países tienen una gran capacidad que pueden alcanzar hasta 15 GW de energía producida por este combustible, se tiene por ejemplo a los EEUU que posee 10 GW de capacidad, seguido por América del Norte con unos 2.4 GW, el Continente Asiático con 711 MW, América del Sur con 147 MW y finalmente el Continente Africano con 33 MW, por lo que existe una significancia mundial mediante este tipo de fuente de energía, generando un mejor panorama de crecimiento energético y dirigiendo enfoques hacia fuentes aún más sostenibles (Scarlat et al. 2018).

No cabe duda que a nivel global la producción de energía es uno de los principales responsables de la emisión de gases de efecto invernadero, particularmente en lo que concierne a la electricidad (Venegas et al. 2023). Según (U. S. Energy Information Administration, 2023), en el 2020 el 61.4% de la electricidad mundial fue derivado de fuentes fósiles, generalmente la obtención de energía con biogás trae impactos en la reducción de requerimientos energéticos en las PTAR. En el caso de una digestión anaeróbica que recibe 100 Kg de DQO (Demanda Química de Oxígeno) en un año, puede generar 285 KW/h con un sistema de aprovechamiento de metano.

En el continente americano, únicamente el 60 % de la población tiene conexión a un sistema de alcantarillado y de esta cantidad, se revela que el 30 al 40% del tratamiento de las aguas residuales

producidas pueden ocasionar impactos desfavorables en la salud pública, la sostenibilidad del medio ambiente y la justicia social (Rodrigues et al. 2021).

Esto amerita sostener que mundialmente ya se viene sacando provecho de los recursos resultantes de los tratamientos referidos; de manera principal en la potencialidad de la generación de biogás en las Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales y su posterior potencial energético. Se tiene por ejemplo que, en los EEUU, diariamente se genera 40 mil millones de galones de aguas residuales que poseen un potencial energético de  $6.65 \times 10^7$  MMBTU / año, de estos  $3.52 \times 10^7$  MMBTU/ año, son aprovechados en energía térmica y  $9.11 \times 10^9$  KWh/año pueden aprovecharse en energía eléctrica, estas plantas emplean el biogás para producir energía, el calentamiento del digestor, para la calefacción y hasta para exportar energía a la red (Shen et al. 2015).

En el país de Colombia, a través del proceso de depuración de aguas residuales se generan hasta 37541 m<sup>3</sup>/mes de biogás. En España se viene planteando una serie de proyectos de aprovechamiento de biogás mediante sistemas de cogeneración, haciendo uso de la electricidad y el calor generados para el beneficio de la planta (CONAMA, 2019). En el caso de México, considerando 10 años antes del 2017, la capacidad de producir biogás se incrementó hasta en un 24.2 % esto en relación al promedio anual, de igual modo en el 2017 la capacidad para producir electricidad a partir de biogás fue de 169 MW (SERNER, 2018).

De acuerdo con el inventario nacional de GEI entre los años 2000 y 2019, se contaron con emisiones de metano de 127,55 Gg (Giga gramos) para el proceso de depuración y disposición de aguas residuales, con un total de 87,27 Gg de metano derivado del tratamiento de aguas residuales domésticas. En el 2019, las emisiones de gases de efecto invernadero de las aguas residuales domésticas alcanzaron hasta un 26.95 % y de las aguas residuales industriales un 10.82%, en la que el metano fue el GEI con mayor generación con un 95.45% de las emisiones totales (MINAM, 2023).

En el Perú, la producción de biogás en las PTAR es una estrategia esencial en la gestión para producir energía renovable y un manejo íntegro de los desechos orgánicos generados, por tal motivo se tiene que en ciertas plantas se están diseñando sistemas de gestión anaeróbica con el fin de generar biogás, que al mismo tiempo tendrá la capacidad de producir metano, que con la posterioridad será empleado para producir electricidad y al mismo tiempo servirá como fuente de calor.

En Lima, la PTAR de Taboada emplea el biogás generado por los lodos del tratamiento de las aguas para abastecer sus necesidades energéticas, esto en razón de que referida planta produce hasta 5MW de energía eléctrica con lo cual cubre hasta un 50% de necesidades energéticas. Del mismo modo se tiene el caso de la PTAR de Arequipa que ha implementado un sistema de cogeneración, caracterizado en la medida de que el gas producido por la digestión anaeróbica se emplea con el fin de generar electricidad,

coadyuvando claramente a la sostenibilidad de los residuos o subproductos del tratamiento (Gobierno Regional de Arequipa, 2020).

La pesquisa es relevante, dado que se ha considerado la implementación de los fundamentos de la economía circular en la PTAR de una localidad de Cusco que esté acompañado de la filosofía de la sostenibilidad y la eficiente gestión del agua para enfrentar el desafío del cambio climático; dado que la economía circular proporciona nuevos enfoques, permitiendo que los residuos vuelvan a integrarse al ciclo productivo como otros recursos útiles, contribuyendo a la seguridad hídrica y a la sostenibilidad del ambiente.

Se debe afirmar que al momento de implementar la economía circular a las PTAR, se posibilita la gestión sostenible a través de la incorporación de sistemas para la emisión y captación del biogás y cogeneración de energía calórica y eléctrica, produciendo una incidencia directa en cuanto a la limitación de utilizar los combustibles fósiles, al recuperar energía del proceso de tratamiento, alineándose a la COP 26 que habla de la reducción del uso de carbón como fuente de energía y subsidios a los combustibles fósiles, así como la recuperación de nutrientes presentes en las aguas de desecho industrial limita las emisiones de GEI como de desechos (Matus et al. 2022).

De igual modo, al momento que se aplican los principios de la economía circular en la gestión de las aguas residuales, centrándose fundamentalmente en la recuperación y reutilización de los recursos primarios y secundarios, permite la transformación de los procesos de saneamiento, cambiándolo de un servicio costoso en uno que sea autosostenible que brinde valor a la economía (Matus et al. 2022). El beneficio de la energía derivado de los lodos de una PTAR en el tratamiento anaeróbico merma las emisiones de GEI en un 21% y puede aportar hasta un 14% de la energía requerida por una planta y contribuir ambientalmente al medio (Aguilar y Blanco 2018).

Por todo lo anteriormente expuesto, se estableció como finalidad de esta investigación analizar la implementación de la economía circular en la gestión sostenible de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cusco, evaluando su viabilidad económica, ambiental y operativa. Y para materializar el estudio en primer lugar se tuvo que identificar los procesos de reutilización y valorización de subproductos en la PTAR.

Posteriormente se analiza la eficiencia económica de la gestión sostenible en términos de reducción de costos y retorno de inversión, para concluir se examinó la incidencia ambiental producido por la economía circular en la planta, tomando en cuenta la reducción de emisiones y el cumplimiento normativo.

## MÉTODO

El enfoque es cualitativo porque el estudio se centra en la comprensión de la realidad existente en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cusco a través de la interpretación de la experiencia humana, que en este particular se trata de los seis (6) trabajadores que prestan sus servicios en la planta y que están perfectamente capacitados para emitir su opinión de una manera profesional y objetiva en las entrevistas realizadas a ellos, con miras a obtener información rica y detallada sobre los significados, las percepciones y las prácticas laborales dentro de la institución analizada.

La investigación tiene un alcance descriptivo porque se pretende caracterizar la economía circular en la gestión sostenible con el fin de establecer su estructura y relacionarla con los beneficios sustanciales que puede obtener la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cusco tras su implementación, bajo las directrices de sostenibilidad, sistemas regenerativos, reutilización y aprovechamiento de subproductos e impacto ambiente y social, garantizando una mejor calidad de vida a sus beneficiados.

La población de estudio estuvo constituida por los colaboradores de la PTAR San Jerónimo de Cusco. Entre los criterios de inclusión están considerados aquellos empleados que se desempeñan mediante contratos; por otro lado, se excluyen aquellos que estén en periodo vacacional o con licencia por motivos ajenos a la voluntad.

Como consecuencia, respecto a la muestra está la conformó un total de seis empleados, de los cuales cuatro cuentan con grado ya sea de magíster o doctor, del mismo modo uno de ellos es ingeniero y finalmente se tiene a un gerente General. De acuerdo a la naturaleza de la pesquisa, que se aplique un muestreo no probabilístico intencional.

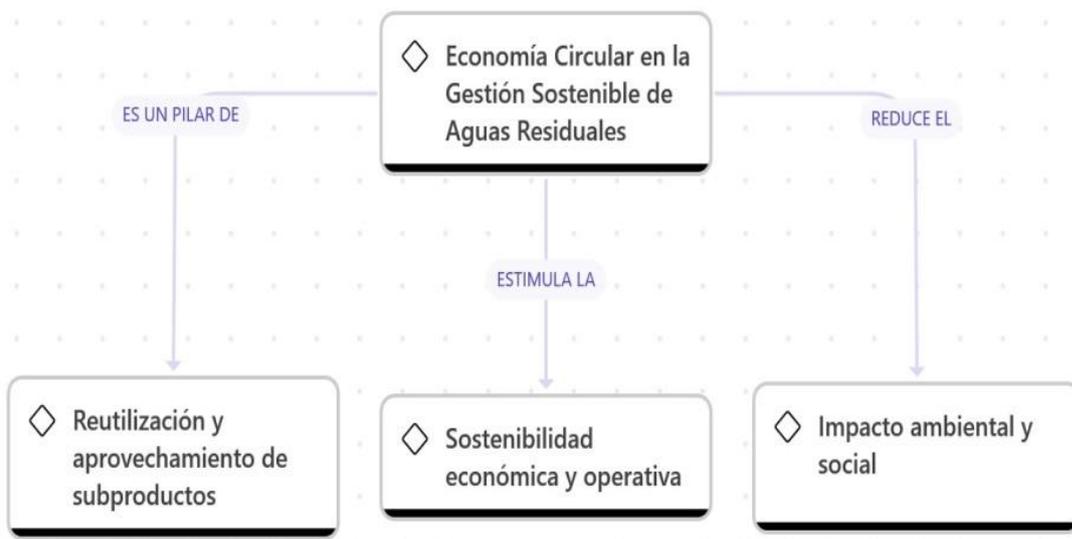
La recolección de datos se hizo gracias a la entrevista como técnica y a la *Guía de Entrevista* como instrumento. La estructura de la guía fue la siguiente:

**Subcategoría 1:** Reutilización y aprovechamiento de subproductos, ella a su vez estuvo desagregada por: Conocimiento sobre economía circular y su impacto en el tratamiento de aguas, descripción de los métodos de recuperación de recursos en la PTAR, Evaluación de estrategias de reutilización de subproductos en la PTAR y Explicación de los procedimientos empleados en la PTAR para el tratamiento de aguas.

**Subcategoría 2:** Sostenibilidad económica y operativa, luego se disgregó en: Identificación de limitaciones y posibilidades de mejora en la PTAR, Análisis de la factibilidad financiera y ambiental de la economía circular en la PTAR, Identificación del impacto económico de la economía circular en la reducción de costos, Factores determinantes para la autosostenibilidad de la PTAR, Determinación de las ventajas económicas obtenidas mediante prácticas sostenibles y Evaluación del impacto financiero y plazo de retorno de inversión en sostenibilidad.



Los entrevistados con relación a la implementación de la economía circular en la gestión sostenible de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cusco, opinaron que la alternativa se muestra como un enfoque medular que coadyuva a la reutilización y aprovechamiento de subproductos provenientes del tratamiento de aguas residuales, esto sin duda permite minimizar desperdicios y por otro lado maximizar el valor de los recursos, por lo que, su realización implica desarrollar estrategias que optimicen el reaprovechamiento de recursos, mejoren la eficiencia operativa y disminuyan los impactos ambientales, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía regenerativa.



**Figura 2.** Red semántica de la categoría

Para poder identificar los procesos de reutilización y valorización de subproductos en la PTAR, se cuenta con los biosólidos como uno de los aspectos esencial en este enfoque, permitiendo la transformación de residuos en recursos valiosos para diversas aplicaciones, también se señala que el tratamiento anaeróbico en digestores permite la obtención de un biosólido rico en fósforo, nitrógeno y potasio, que posteriormente se utiliza como fertilizante para plantas de tallo alto.

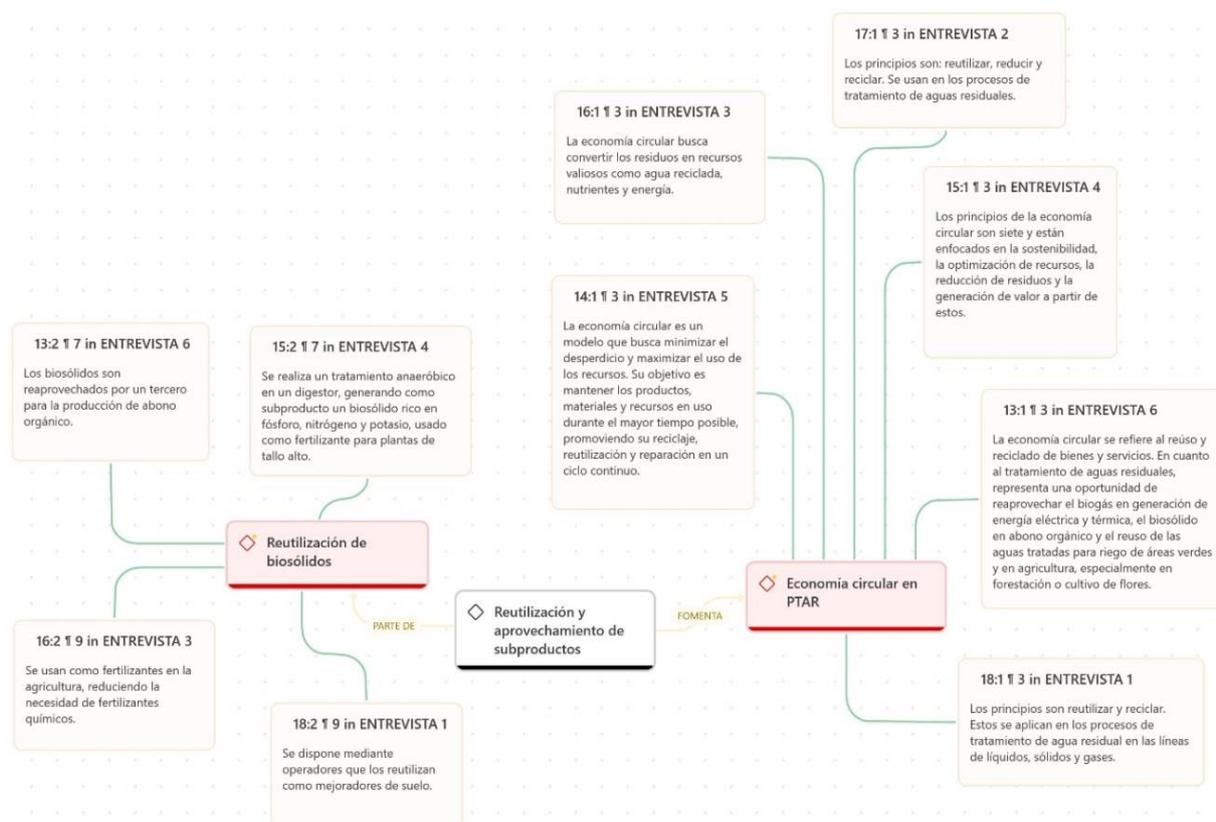


Figura 3. Red de citas de la subcategoría 1

Asimismo, la reutilización de biosólidos en la agricultura se ha comprobado que es una estrategia eficaz en la medida que permite mermar la dependencia de fertilizantes químicos. El enfoque de economía circular aplicado en la PTAR incluye también la optimización del uso del biogás producido durante el proceso de tratamiento siendo reaprovechado en la generación de energía eléctrica y térmica, coadyuvando con ello a la eficiencia operativa de la planta.

Se tiene que, de esta forma, tanto la reutilización como la valorización de subproductos en la PTAR no solo beneficia a la sostenibilidad ambiental, sino que también produce oportunidades económicas al transformar los residuos en insumos útiles para sectores agrícolas y diversas industrias.

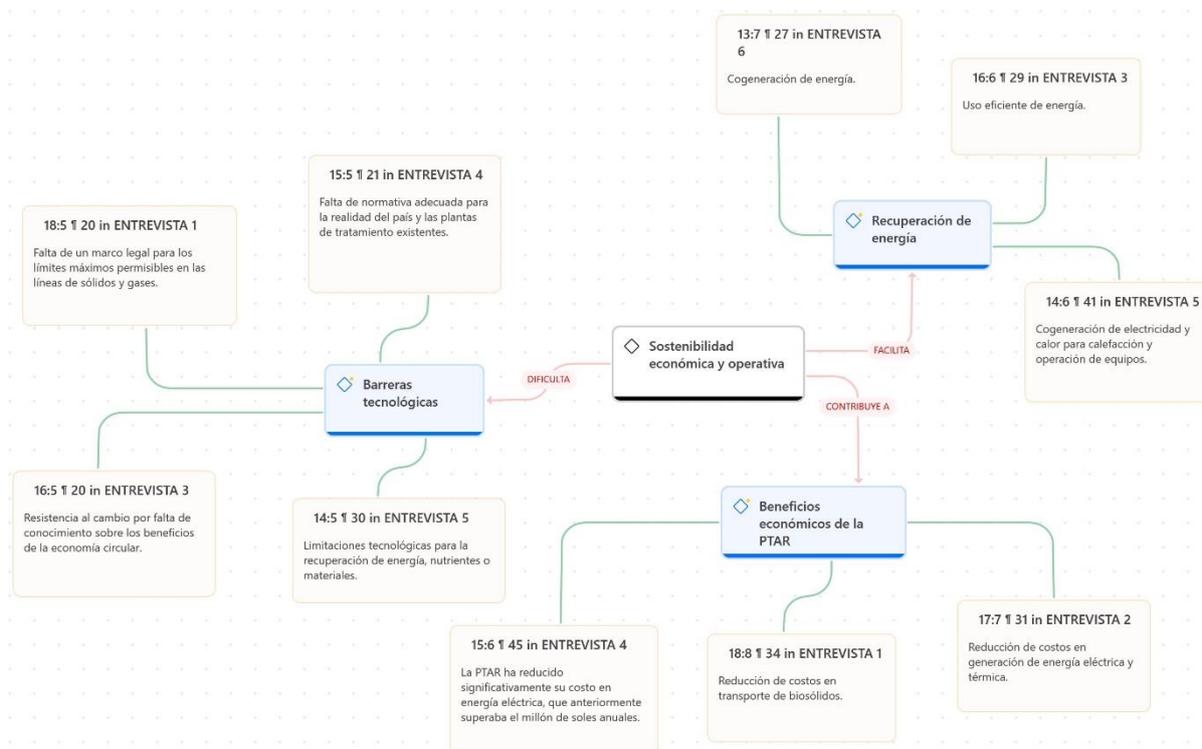


Figura 4. Red de citas de la subcategoría 2

La sostenibilidad económica y operativa de la PTAR, se haya directamente relacionada con la recuperación de energía y la optimización de costos, situación que ha permitido un ahorro sustancial en términos operativos, a pesar de ello, se evidencian desafíos tecnológicos y regulatorios que deben abordarse para maximizar el retorno de inversión y con ello que se garantice la viabilidad a largo plazo del modelo de economía circular en la planta.



Figura 5. Red de citas de la subcategoría 3

Con respecto a la implementación de un modelo de economía circular en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ha permitido generar un impacto ambiental positivo, esto se ve reflejado en la disminución de emisiones contaminantes y el cumplimiento de un marco normativo ambiental, mermando la contaminación del agua y del aire, así como contribuyendo a la disminución del cambio climático. Los

avances descritos fueron dados gracias a un enfoque riguroso en el cumplimiento normativo y en la optimización de procesos, lo que garantiza la sostenibilidad ambiental de la planta a largo plazo.

## Discusión

El análisis de la implementación de la economía circular en la gestión sostenible de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cusco se ha podido identificar aspectos que concuerdan, pero también otras situaciones con las cuales se puede discrepar en relación a trabajos previos nacionales e internacionales sobre la temática planteada. En este contexto, es posible resaltar que la economía circular muestra como un principal enfoque para ejecutar la reutilización de subproductos del tratamiento de aguas residuales, permitiendo que se minimicen desperdicios y maximizar el aprovechamiento de recursos, así como que se garantice la sostenibilidad económica y operativa a largo plazo.

En contraste con las investigaciones mundiales, el estudio de (Centeno E., Cruz N. y Vidal P., 2024), en el país de Costa Rica se desarrolló la necesidad de buscar el mejoramiento de la gestión de aguas residuales con un enfoque sostenible, pudiendo identificar la poca adopción de tecnologías anaeróbicas y la carencia de un marco regulatorio claro como barreras significativas, resaltando lo importante que es modernizar normativas y de manera progresiva ir buscando el mejoramiento de la capacitación técnica para avanzar en la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales.

A nivel Perú, (Yupanqui et al. 2024), realizaron una propuesta referida a una reingeniería de los procesos en una PTAR; la finalidad fue la optimización de la eficiencia y rentabilidad, mediante la búsqueda del mejoramiento de equipos y procesos. Este estudio mantiene una similitud con la implementación de estrategias de economía circular en la PTAR de Cusco, esto en razón de que en los dos casos existe la idea de aumentar la eficiencia operativa, empero, se tiene que en la pesquisa referencial se prioriza la mejora de infraestructuras y equipos específicos, en el estudio realizado se adopta una visión más integral, dado que no solo se aborda la optimización técnica, sino además la disminución del impacto ambiental a través del reaprovechamiento de subproductos.

Del mismo modo, (Gil y Natividad 2023) se interesaron por investigar la optimización de la gestión de lodos residuales mediante un proceso de secado térmico, cuya finalidad fue reducir costos y hacer una exploración de su uso como fertilizante. Este antecedente tiene una clara concordancia con el enfoque de la PTAR de Cusco, en relación al aprovechamiento de subproductos del tratamiento de aguas residuales. Pero, en Cusco la propuesta de economía circular es más amplia, dado que engloba la optimización de la eficiencia operativa como la disminución del impacto ambiental en un sentido más holístico.

Si bien es cierto que se evidencia similitudes con estudios previos, especialmente en lo que se relaciona con la reutilización de subproductos y la búsqueda de sostenibilidad económica, el estudio

desarrollado en Cusco tiene una perspectiva más integradora al considerar el impacto ambiental, social y operativo de manera paralela. A partir de ello se puede señalar que la economía circular puede ser considerada como una herramienta clave para el mejoramiento de la gestión de aguas residuales, siempre que puedan adaptarse las estrategias a las particularidades del contexto local.

Sobre la reutilización y valorización de subproductos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) está inscrito dentro del marco de la economía circular, orientada a maximizar el aprovechamiento de los recursos y disminuir el impacto ambiental de los residuos. En el estudio realizado en la PTAR, se pudo identificar que los biosólidos generados son utilizados en la producción de abono orgánico y fertilizantes para la agricultura, mientras tanto el biogás se emplea para la generación de energía eléctrica y térmica.

Este arquetipo de estudio fomenta una gestión sostenible de los residuos y produce beneficios económicos al transformar subproductos en insumos útiles al contrastar estos hallazgos con los trabajos previos mundiales y del Perú, se es posible notar aspectos concordantes como también aquellos que son distintos al momento de aplicar estrategias de economía circular.

Se tiene que la investigación de (Rodrigues et al. 2024) enfatizan la relevancia resaltan la importancia de reutilizar los subproductos del tratamiento de aguas residuales, enfatizando su potencial en la agricultura y la generación de energía mejorando la calidad del suelo y sustituir parcialmente los fertilizantes químicos, aunque su adopción enfrenta barreras culturales y regulatorias. De manera similar, destacaron la necesidad de fortalecer el uso de subproductos como el agua tratada y el biogás para avanzar en la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales. Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en la PTAR, donde la valorización de biosólidos y biogás representa una estrategia clave para la sostenibilidad.

No obstante, existen diferencias importantes en los desafíos identificados. Mientras que en la PTAR la reutilización de biosólidos y biogás es una práctica implementada con beneficios claros, los estudios internacionales señalan obstáculos significativos, como la falta de aceptación social, la insuficiencia de normativas claras y la necesidad de capacitación técnica. Por ejemplo, en Costa Rica, (Centeno et al. 2024), evidenciaron que la baja adopción de tecnologías anaeróbicas se debe a la falta de marcos regulatorios adecuados y financiamiento. En Argentina, (Diez et al. 2024) encontraron que, a pesar de la disposición de la población para reciclar residuos eléctricos y electrónicos, los modelos de negocio actuales no son económicamente viables sin incentivos gubernamentales. Estas dificultades contrastan con el caso de la PTAR, donde los subproductos ya tienen una valorización efectiva en la agricultura y la generación de energía.

A nivel nacional, los estudios de (Yupanqui K., Espinoza W., Alhua B. y Cornejo J., 2024); (Gil y Natividad 2023) presentan hallazgos más alineados con los resultados de la PTAR. Yupanqui y

colaboradores destacaron la necesidad de optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales para mejorar la eficiencia operativa de la planta, mientras que Gil y Natividad exploraron el secado térmico de lodos residuales para reducir costos de transporte y evaluar su uso como fertilizante. Este último punto guarda relación con la reutilización de biosólidos en la PTAR, aunque el estudio de Gil y Natividad advierte sobre la necesidad de más investigaciones debido a la presencia de metales pesados.

Asimismo, (Paucar y Iturregui 2020) señalaron la importancia de fortalecer el marco normativo en Perú para fomentar la reutilización de aguas residuales en sectores como la agricultura y la industria.

Con respecto a la eficiencia económica de la gestión sostenible en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se analiza en términos de reducción de costos y retorno de inversión, estableciendo un marco para evaluar su viabilidad económica dentro de la economía circular. Los hallazgos del estudio realizado en la PTAR muestran que la implementación de estrategias de valorización de subproductos, como la reutilización de biosólidos en la agricultura y la generación de biogás para energía, ha permitido una disminución significativa en los costos operativos y una mejora en la rentabilidad del proceso. Estas prácticas optimizan el uso de los recursos y contribuyen a un modelo autosostenible de tratamiento de aguas residuales.

Al contrastar estos resultados con los antecedentes internacionales y nacionales, se identifican similitudes en la intención de fomentar la economía circular como estrategia para mejorar la sostenibilidad, pero también se evidencian diferencias en los desafíos económicos y regulatorios que enfrenta cada contexto. Por ejemplo, el estudio de (Diez et al. 2024) en Argentina el estudio vinculado con el reciclaje de residuos eléctricos y electrónicos (RAEE), dio a conocer que, si bien existe una disposición favorable por parte de la población para proporcionar gratuitamente estos residuos, la viabilidad financiera del proyecto es negativa, en razón a los elevados costos laborales y la ausencia de incentivos económicos.

A partir de la información anterior se puede establecer que con la ausencia de políticas públicas que beneficien la disminución de costos o la valorización de los materiales reciclados, el modelo no es sostenible en términos económicos. En contraste con la PTAR analizada, el aprovechamiento de subproductos ya produce beneficios financieros, esto señala un grado mayor de consolidación en la integración de la economía circular en su operación.

Dentro de la realidad que caracteriza a Brasil (Bezerra et al. 2021), se encargaron de analizar los diferentes desafíos de la gestión de residuos sólidos y pusieron énfasis en la ineficiencia de la administración pública en la aplicación de la normativa ambiental. Su estudio pone en relieve que el hecho de que la falta de cumplimiento de una Política Nacional de Residuos Sólidos impide la consolidación de un modelo económicamente viable para la valorización de residuos; esta realidad descrita es contraria con la situación

de la PTAR, donde a partir de la implementación de mecanismos eficientes ha permitido la merma de los costos y la optimización del uso de recursos.

En el Perú, (Yupanqui et al. 2024), se interesaron por evaluar la eficiencia y rentabilidad de una planta de tratamiento de aguas residuales, se enfocaron en la optimización de sus procesos operativos. A partir de sus resultados pudieron demostrar que el mejoramiento del diseño de biorreactores y pretratamiento permite que se logre un equilibrio entre la sostenibilidad y eficiencia económica, lo que concuerda con los hallazgos obtenidos en la PTAR estudiada. Del mismo modo, (Gil y Natividad 2023), en su pesquisa se interesaron por proponer un método de secado térmico para lodos residuales en la PTAR Santa Clara, a partir de esta propuesta se puede disminuir los costos relacionados al transporte y producir insumos con potencial comercial, aunque persisten desafíos vinculados con la presencia de metales pesados.

La evaluación de la eficiencia económica en la PTAR demuestra que la gestión sostenible tiene la capacidad de originar beneficios financieros mediante la valorización de subproductos, alineándose con la economía circular. Sin embargo, en contraste con los trabajos previos analizados, se ha podido observar que la viabilidad económica de estos modelos depende en gran medida de factores como la existencia de incentivos gubernamentales, la infraestructura disponible y la aceptación social. Por su parte en la PTAR estudiada se ha logrado bajar costos y superar el retorno de inversión mediante estrategias de reutilización. Otros estudios precisan que, de no existir un marco regulador adecuado y mecanismos de apoyo financiero, la implementación de estos modelos puede verse impedida. Estos hallazgos enfatizan la relevancia que tienen las políticas públicas que fomenten la transición hacia sistemas más sostenibles y económicamente rentables en la gestión de residuos y aguas residuales.

En base al análisis del impacto ambiental causado por la economía circular en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se acredita un enfoque en la reducción de emisiones contaminantes y el cumplimiento normativo. Este hallazgo se distribuye con distintas exploraciones anteladas relacionadas con la implementación de modelos de economía circular en el ámbito del tratamiento de residuos y aguas, tanto a nivel internacional como nacional, admitiendo con ello la identificación de similitudes y diferencias en relación con los antecedentes estudiados.

En términos de concordancia, la indagación vinculada con la PTAR comparte con el estudio de (Rodrigues et al. 2021), la expresión en el sentido de que la economía circular puede contribuir a la merma del impacto ambiental mediante la reutilización de recursos. Mientras que Rodrigues y asociados analizaron la reutilización de aguas residuales tratadas con el fin de buscar el mejoramiento de la calidad del suelo y reducir el uso de fertilizantes químicos. En la PTAR se han implementado procesos de tratamiento que han permitido mejorar la calidad del agua del río Huatanay, lo que refuerza la importancia de una gestión eficiente del recurso hídrico en la transición hacia un modelo circular.

Por otro lado, una marcada diferencia entre el hallazgo de la PTAR y los antecedentes, está evidenciado en la viabilidad económica de los proyectos analizados. Mientras que (Diez et al. 2024), arribaron a la conclusión de que el reciclaje de residuos eléctricos y electrónicos en Argentina, no obstante, a su potencial ambiental, no era económicamente viable sin incentivos gubernamentales, en la PTAR se han implementado medidas que permitieron disminuir la dependencia de combustibles fósiles a través la valorización del metano en biogás. Este aspecto no solo contribuye a la merma del cambio climático, sino que también optimiza el uso de recursos, lo que sugiere una mayor sostenibilidad financiera en comparación con otros modelos de economía circular que necesitan de políticas de subsidios para su viabilidad.

Se recalca que la indagación al mismo tiempo también presenta puntos en común con investigaciones nacionales como la de (Gil y Natividad 2023), los mismos que analizaron la optimización del uso de lodos residuales mediante secado térmico. En los dos casos, se buscó maximizar la eficiencia en el tratamiento de residuos y disminuir su impacto ambiental. Empero, mientras que la optimización en la PTAR se ha centrado en la reducción de emisiones y el cumplimiento de estándares de calidad del efluente, la investigación de Gil y Natividad exploró el aprovechamiento del lodo residual como fertilizante, ampliando así las oportunidades de reutilización de los subproductos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

El estudio sobre la implementación de la economía circular en la PTAR valida la relevancia de optimizar los procesos de tratamiento de aguas para mermar la contaminación y cumplir con los estándares ambientales. Sus hallazgos coinciden con estudios antelados en cuanto a la necesidad de marcos normativos idóneos, la relevancia de la economía circular en la mitigación del impacto ambiental y la importancia de estrategias tecnológicas sostenibles. No obstante, se distingue en su enfoque en la viabilidad económica y en el éxito de su implementación sin la necesidad de incentivos externos, lo que sugiere que la adopción de modelos circulares puede ser efectiva siempre que se combinen innovación, compromiso regulatorio y optimización de procesos.

## CONCLUSIONES

En líneas generales se puede afirmar que la implementación de la economía circular en la gestión de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cusco demuestra ser una estrategia clave para fortalecer la sostenibilidad del sistema, al permitir la reutilización eficiente de subproductos, minimizar desperdicios y optimizar el uso de recursos. Además de mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad, este enfoque contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental y social, alineándose con modelos de gestión sostenible. Se recomienda desarrollar políticas públicas y normativas que incentiven la adopción de modelos de economía circular en la gestión de aguas residuales, asegurando su viabilidad a largo plazo mediante financiamiento, capacitación técnica y apoyo institucional.

Asimismo, se determinó que la reutilización y valorización de subproductos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Cusco se alinean con los principios de la economía circular, maximizando el aprovechamiento de los recursos y reduciendo el impacto ambiental. Se ha identificado que los biosólidos generados son utilizados en la producción de abono orgánico y fertilizantes para la agricultura, mientras que el biogás se emplea en la generación de energía eléctrica y térmica, promoviendo una gestión sostenible de los residuos y generando beneficios económicos. No obstante, es fundamental mejorar la infraestructura tecnológica de la PTAR para optimizar la transformación de biosólidos y biogás, además de fomentar alianzas estratégicas con el sector agrícola e industrial que permitan una mayor demanda y comercialización de estos subproductos.

En cuanto a la eficiencia económica de la gestión sostenible en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se ha fortalecido mediante la valorización de subproductos y la recuperación de energía, lo que ha permitido una reducción significativa de costos operativos y un retorno de inversión positivo. La cogeneración de electricidad y la reutilización de biosólidos han optimizado el uso de recursos, consolidando un modelo más autosostenible, no obstante, la viabilidad económica a largo plazo enfrenta desafíos tecnológicos y regulatorios, lo que resalta la necesidad de incentivos gubernamentales y un marco normativo adecuado, para consolidar la transición hacia un modelo eficiente y sostenible de economía circular. En el mismo orden y sentido, se sugiere establecer incentivos fiscales y mecanismos de financiamiento para impulsar inversiones en tecnologías avanzadas, garantizando la sostenibilidad económica del modelo y reduciendo la dependencia de subsidios estatales.

Y por último se tiene que la implementación de la economía circular en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ha generado un impacto ambiental positivo, reflejado en la reducción de emisiones contaminantes y el cumplimiento de normativas ambientales. La optimización de procesos ha permitido mejorar la calidad del agua del río Huatanay y minimizar la contaminación, mientras que la valorización del metano en biogás ha contribuido a la reducción de gases de efecto invernadero y a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles. A pesar de estos avances, persisten oportunidades de mejora en la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), lo que resalta la importancia de seguir optimizando los procesos. En conjunto, los hallazgos evidencian que la economía circular puede ser una estrategia efectiva para mitigar el impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad de la PTAR a largo plazo. Se sugiere implementar tecnologías más eficientes para la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y otras sustancias contaminantes, además de fortalecer el monitoreo ambiental continuo para evaluar y mejorar los procesos de tratamiento de aguas residuales.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

## REFERENCIAS

- Aguilar, I., y Blanco, P., (2018). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo. *Revista de Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222018000200086](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222018000200086).
- Benitez, I., y Blanco, P. (2020). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 73-96. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222018000200086](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222018000200086).
- Bezerra, A., Rocha, P., y Moita, J. (2021). Resíduos sólidos: A má gestão pública como problema ambiental. *Veredas do Direito*, 17(39), 39-66. <https://revista.domhelder.edu.br/index.php/veredas/article/view/1694>
- Centeno, E., Cruz, N. y Vidal, P. (2024). Tratamiento de aguas residuales ordinarias en costa rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad. *Ingeniería*, 34(1), 7-22. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.15517/ri.v34i1.55222>
- CONAMA, (2019). Agua y Economía Circular. Anexo II: Fichas de proyectos de innovación en materia de agua y economía circular. Madrid: Informe CONAMA. <https://www.fundacionconama.org/wp-content/uploads/Agua-y-Economia-Circular-Anexo-II.pdf>.
- Diez, J., Tedesco, L. y Imaz, A. (2024). Economía circular y ambiente: una evaluación económico-financiera para la instalación de una planta de reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Ciencias Ambientales*, 59(1), 20414. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.15359/rca.59-1.2>.
- Gil, A. y Natividad, L. (2023). Deshidratación de lodo residual a escala piloto en un secador convectivo rotacional: Caso Planta de Tratamiento de Aguas Santa Clara, provincia de Lima, Perú. *TECNIA*, 33(1), 21-32. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v33i1.1550>
- Gobierno Regional de Arequipa. (2020). Proyecto de Cogeneración de Energía con Biogás en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Arequipa: GORE. <https://www.gob.pe/regionarequipa>
- Larios, M., González T. y Morales O. (2016). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y Hacer*, 2(2), 8-25. <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/115>.
- Matus, S., Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L. y Sarmanto, N. (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48613-oportunidades-la-economia-circular-tratamiento-aguas-residuales-america-latina>.
- Ministerio del Ambiente-MINAM. (2023). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2019. <https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2023/01/Informe-INGEI-2019-VF.pdf>.
- Paucar, F., y Iturregui, P. (2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. *South Sustainability*, 1(1) <file:///C:/Users/user/Downloads/599-Article%20Text-1968-1-10-20200604.pdf>
- Rodrigues, L., Magalhães, A., Barbosa, A. y Medeiros S. (2021). Águas residuais: uma abordagem social de políticas públicas e ambiental. As múltiplas faces do PROFCIAMB: impactos nas Ciências Ambientais. Feira de Santana: UEFS Editora, 2021 299-317. [https://www.researchgate.net/publication/380739557\\_Aguas\\_residuais\\_uma\\_abordagem\\_social\\_de\\_politicas\\_publicas\\_e\\_ambiental](https://www.researchgate.net/publication/380739557_Aguas_residuais_uma_abordagem_social_de_politicas_publicas_e_ambiental)

- Rodríguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D. y Saltiel G. (2019). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Washington. <http://hdl.handle.net/10986/33436>
- Scarlat, N., Dallemand J. y Fahl F., (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Secretaría de Energía-SERNER, (2018). Prospectiva de energías renovables 2018-2032. México: Secretaría de Energía. <https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>
- Shen Y., Linville J., Demirtas M., Mintz M. y Snyder S., (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346-362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>
- U. S. Energy Information Administration. (2023). World Energy Projection System 2021. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/tables\\_side\\_xls.php](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/tables_side_xls.php)
- Venegas, J., Ruiz R., Hernández F., Fernández A., Arya D. y Aguilar F. (2023). Potencial de biogás, energía eléctrica, reducción de CO<sub>2</sub>eq y rentabilidad de biodigestor-motogenerador para establos lecheros en México. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 33(62). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2395-91692023000200122](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2395-91692023000200122).
- Yupanqui, K., Espinoza, W., Alhua, B. y Cornejo J. (2024). Reingeniería y optimización de los procesos de la planta de tratamientos de aguas residuales “Doris Mendoza”. *Prohominum. Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 6(1), 134-150. <https://doi.org/10.47606/acven/ph0233>