

**Evaluación de alternativas de reutilización de biogás y biosólidos en la Estación de  
Tratamiento de agua residual del municipio de Tunja**

**Anamaría Romero Ortíz**

**Universidad de Boyacá  
Facultad de ciencias e ingeniería  
Ingeniería Sanitaria  
Tunja  
2024**

**Evaluación de alternativas de reutilización de biogás y biosólidos en la Estación de  
Tratamiento de agua residual del municipio de Tunja**

**Anamaría Romero Ortíz**

**Trabajo de grado para optar al título de:  
Ingeniera Sanitaria**

**Director (a):**

**Jaime Díaz Gómez**

**Msc. en Ciencias Ambientales y Tecnología del IHE-Delft**

**Codirector (a):**

**David Felipe Bermúdez Duarte**

**Ingeniero Sanitario y Ambiental**

**Universidad de Boyacá**

**Facultad de ciencias e ingeniería**

**Ingeniería Sanitaria**

**Tunja**

**2024**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Tunja, 05 de junio de 2024

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.  
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

### **Agradecimientos**

Es importante resaltar el valioso acompañamiento y apoyo proporcionado por los asesores de este proyecto, gracias a sus orientaciones y asistencia, se pudo llevar a cabo el trabajo en campo, analizar los fenómenos ocurridos y elaborar el plan de trabajo correspondiente. Asimismo, extender el agradecimiento a la empresa VEOLIA y a sus colaboradores por facilitar el acceso a sus instalaciones, así como por brindar el apoyo necesario para la toma de muestras respectivas.

## Contenido

	Pág.
Introducción .....	16
Estimación de la producción de biogás en el reactor UASB de la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja considerando su potencial de aprovechamiento .....	20
Metodología del modelo de Lobato .....	20
Fase 1. Cuantificación de Biogás.....	24
Cuantificación de la producción de lodo en sistemas anaerobios para su tratamiento en la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja .....	52
Producción volumétrica de lodo.....	52
Propuesta de aprovechamiento de los subproductos en la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja .....	61
Escenarios 1 y 2.....	62
Propuesta de aprovechamiento para el sistema de tratamiento de Samacá .....	67
Conclusiones .....	71
Recomendaciones .....	74
Referencias.....	75
Anexos .....	77

### Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos de entrada.....	22
Tabla 2. Resultados de las caracterizaciones de agua residual del municipio de Tunja .....	26
Tabla 3. Resultados de las caracterizaciones del municipio de Samacá.....	27
Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de las fracciones en el balance de masas de DQO y del potencial de recuperación de energía .....	32
Tabla 5. Resultados estimación de Biogas de la estación de tratamiento del municipio de Tunja	42
Tabla 6. Datos de consumo real de la ETAR de Tunja .....	44
Tabla 7. Datos obtenidos de las simulaciones .....	44
Tabla 8. Resultados estimación de Biogas de la estación de tratamiento del municipio de Samacá .....	47
Tabla 9. Resultados producción de lodo de la estación de tratamiento del municipio de Tunja ..	58
Tabla 10. Resultados producción de lodo de la estación de tratamiento del municipio de Samacá. ....	60

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Rutas de conversión de DQO y flujos de metano en reactores UASB.....	21
Figura 2. Esquema del sistema de tratamiento del municipio de Tunja .....	25
Figura 3. Esquema del sistema de tratamiento del municipio de Samacá .....	25
Figura 4. Eficiencias de remoción de los sistemas de Tunja y Samacá.....	31
Figura 5. Balance de masas de DQO y estimación de biogás para el escenario típico.....	45
Figura 6. Balance de masas de DQO y estimación de biogás para el peor escenario.....	45
Figura 7. Balance de masas de DQO y estimación de biogás para el mejor escenario .....	45
Figura 8. Resultados obtenidos de la simulación del software .....	49
Figura 9. Gráficos obtenidos de la simulación.....	50
Figura 10. Resultados de la simulación .....	51
Figura 11. Escenario 1. Secado térmico del 100% del lodo generado.....	64
Figura 12. Escenario 2. Asumir que el 40% es llevado a secado térmico .....	65
Figura 13. Energía disponible de Biogas Tunja vs Samacá.....	69

### Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto .....	78
Anexo B. Evidencias fotográficas.....	110
Anexo C. Estimación de la producción y el tratamiento de biogás para recuperación en ETAR reactores anaerobios adjunto CD ROM.....	111

## Glosario

**Biogás:** El biogás es considerado un gas renovable compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono, hidrógeno ( $H_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), se produce mediante la degradación anaerobia de la materia orgánica en el reactor UASB. La composición del biogás derivado de procesos anaerobios en el tratamiento de aguas residuales domésticas oscila entre el 55% y el 75% de metano ( $CH_4$ ). Aunque es inflamable y tiene un alto potencial de calentamiento global (28 veces más que el  $CO_2$ ), su poder calorífico lo hace valioso para usos energéticos (Chernicharo et al., 2019).

**Biosólidos:** Una vez estabilizados, los lodos se denominan biosólidos y pueden aprovecharse en diversas aplicaciones, como compostaje, fertilizantes, mejoradores de suelos, reutilización en procesos industriales y generación de energía eléctrica (Remis et al., 2012).

**Centrífuga:** Una centrífuga para el tratamiento de lodos es un equipo utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales para separar los sólidos suspendidos del agua residual. Funciona aprovechando la fuerza centrífuga generada por la rotación rápida de un tambor o disco dentro de la centrífuga. Al aplicar esta fuerza, los sólidos más densos, como los lodos, son empujados hacia las paredes del tambor, mientras que el agua residual más clara se separa y se recoge en el centro. Este proceso de separación permite la eliminación eficiente de los sólidos del agua residual, lo que facilita su posterior tratamiento o disposición final. Las centrífugas son una parte importante en el proceso de tratamiento de aguas residuales, ayudando a reducir la carga de sólidos en el agua tratada y mejorando su calidad antes de ser devuelta al medio ambiente (Silva et al., 2019).

**CHP:** la generación de electricidad a partir de biogás se conoce como calor y energía combinados, o CHP por sus siglas en inglés, Combined Heat and Power, generalmente mediante turbinas de vapor o gas, este método representa el enfoque convencional de generación, pero su eficiencia es relativamente baja, rondando el 35%, lo que resulta en considerables pérdidas de energía. Es por esta razón que actualmente se aboga por sistemas combinados de calor y energía (CHP). Ya sea mediante un motor de combustión interna o una turbina a gas, este enfoque permite un aprovechamiento más eficiente de la energía derivada de la combustión del biogás, mejorando

significativamente la eficiencia. Incluso autores como Chernicharo proponen alternativas para la utilización integral de sistemas completos de tratamiento de aguas residuales y sus subproductos (Carrasco, 2015).

**Estabilización alcalina:** La estabilización alcalina de lodos es un proceso utilizado en el tratamiento de aguas residuales para reducir la cantidad de agentes patógenos y controlar el olor de los lodos generados en las plantas de tratamiento. Consiste en añadir sustancias alcalinas, como cal o cal hidratada, a los lodos para elevar su pH a niveles que inhiban el crecimiento de microorganismos dañinos. Esto ayuda a estabilizar los lodos, disminuyendo su potencial para generar olores desagradables y reduciendo el riesgo de propagación de enfermedades. La estabilización alcalina también puede mejorar la gestión de los lodos, haciéndolos más seguros de manejar y facilitando su disposición final (Lozada, et al., 2013).

**Lodos residuales:** Los lodos residuales son compuestos orgánicos de carbono, que constituyen aproximadamente el 60% de su base seca. Estos compuestos son en su mayoría de origen biológico e incluyen microorganismos, fibras y sustancias poliméricas extracelulares, también conocidas como sustancias húmicas. Además, los lodos residuales pueden contener partículas inorgánicas, como silicatos y metales pesados, así como patógenos y otros contaminantes microbiológicos. Por otro lado, el contenido de agua en los lodos residuales varía típicamente entre el 63% y el 99% (Remis et al., 2012).

**Secado térmico:** El secado térmico de lodos es un proceso utilizado en el tratamiento de aguas residuales para reducir el contenido de agua de los lodos generados en las plantas de tratamiento. Consiste en aplicar calor a los lodos húmedos para evaporar el agua contenida en ellos, lo que resulta en la reducción del volumen de los lodos y en la obtención de un producto más sólido y manejable. Este proceso puede realizarse utilizando diferentes tecnologías, como secadores rotativos, de banda o de lecho fluidizado. El objetivo principal del secado térmico de lodos es facilitar su disposición final, ya sea mediante su incineración, compostaje o disposición en vertederos (Silva et al., 2019).

## Resumen

### **Evaluación de alternativas de reutilización de biogás y biosólidos en la Estación de Tratamiento de agua residual del municipio de Tunja**

Este documento detalla el análisis y el trabajo realizado para la elaboración de una propuesta destinada a aprovechar los subproductos en la estación de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tunja. Esta estación cuenta con un sistema de tratamiento altamente completo, lo que representa una excelente oportunidad para la utilización de los subproductos generados en el tratamiento anaerobio. Este último ofrece una serie de ventajas que pueden compensar ciertos costos de operación. Inicialmente, se llevó a cabo una estimación teórica de la producción de biogás en el reactor UASB de la estación de tratamiento, teniendo en cuenta su potencial de aprovechamiento.

Asimismo, se realizó una cuantificación de la producción de lodo en sistemas anaeróbicos para su posterior tratamiento. Finalmente, se presenta una propuesta para el aprovechamiento de los subproductos del reactor anaerobio de la estación de tratamiento. Lo anterior permite alcanzar al principal objetivo de este proyecto el cual fue evaluar alternativas de reutilización de biogás y biosólidos en la Estación de Tratamiento de agua residual del municipio de Tunja.

Para la cual se desarrolló una metodología de tipo descriptiva con enfoque cuantitativo, pues se tuvo una etapa de evaluación en la cual se hizo un reconocimiento del sistema de tratamiento y todos los procesos que se desarrollan dentro de este, posteriormente se inició con la toma de muestras y las caracterizaciones del agua residual, que son los datos base para estimar la producción de lodo y biogás del sistema de digestión anaerobia (reactor UASB). Dicha estimación se realizó mediante la metodología planteada en el software Probio el cual fue desarrollado por Possetti y sus colaboradores, así mismo se incluye el diseño de un reactor UASB con el software Etsus.

El aprovechamiento de subproductos representa una gran ventaja para cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales ya que a largo plazo estos procesos se convierten en sostenibles.

El análisis concluyó en que es posible suplir parte de la energía requerida convirtiendo el biogás en energía eléctrica y térmica, así mismo, al generar energía se generan gases de escape que se pueden utilizar para secar térmicamente los lodos del reactor UASB.

**Palabras claves:** Biogás, lodos residuales, biosólidos, sistema anaerobio

## **Abstract**

### **Assessment of Biogas and Biosolids Reuse Alternatives at the Wastewater Treatment Plant of Tunja Municipality**

This document details the analysis and work carried out for the development of a proposal aimed at harnessing by-products at the wastewater treatment plant in the municipality of Tunja. This plant has a highly comprehensive treatment system, which represents an excellent opportunity for the utilization of by-products generated in anaerobic treatment. The latter offers a series of advantages that can offset certain operating costs. Initially, a theoretical estimation of biogas production in the UASB reactor of the treatment plant was carried out, taking into account its utilization potential.

Likewise, a quantification of sludge production in anaerobic systems was conducted for subsequent treatment. Finally, a proposal for the utilization of by-products from the anaerobic reactor of the treatment plant is presented. This allows us to achieve the main objective of this project, which was to evaluate alternatives for the reuse of biogas and biosolids at the wastewater treatment plant in the municipality of Tunja.

A descriptive methodology with a quantitative approach was developed for this purpose, as there was an evaluation stage in which the treatment system and all the processes within it were recognized. Subsequently, sampling and characterization of wastewater were initiated, which are the baseline data for estimating sludge and biogas production from the anaerobic digestion system (UASB reactor). This estimation was carried out using the methodology proposed in the Probio software, which was developed by Possetti and his collaborators, and it also includes the design of a UASB reactor using the Etsus software.

The utilization of by-products represents a great advantage for any wastewater treatment system, as these processes become sustainable in the long run. The analysis concluded that it is possible to supply part of the required energy by converting biogas into electrical and thermal energy. Additionally, by generating energy, exhaust gases are produced that can be used to thermally dry the sludge from the UASB reactor.

**Keywords:** Biogas, residual sludge, biosolids, anaerobic system

## Introducción

Durante varios años, las estaciones de tratamiento de aguas residuales han sido diseñadas bajo la premisa de que las aguas residuales domésticas son simplemente desechos líquidos que deben ser purificados de sólidos y materia orgánica antes de ser vertidos en cuerpos de agua. Este enfoque convencional implica una serie de procesos de tratamiento secuenciales que transforman las aguas residuales hasta que cumplen con estándares aceptables en términos físico-químicos y biológicos para su liberación. Sin embargo, es importante reconocer que durante el proceso de tratamiento de aguas residuales se producen subproductos en forma líquida, sólida y gaseosa, los cuales requieren una gestión adecuada para mitigar posibles impactos ambientales. Además, es relevante explorar la posibilidad de aprovechar estos subproductos como fuentes alternativas de agua, energía y nutrientes (Possetti et al., 2019).

En América Latina, especialmente en países como Brasil y Colombia, los sistemas anaeróbicos han experimentado un aumento en su popularidad para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta preferencia se debe a su eficiencia, economía y requisitos de mantenimiento reducidos. Además, se destacan por su diseño compacto y la generación mínima de lodo en exceso. Aunque esta característica es ventajosa, es crucial gestionar el lodo de manera adecuada debido a su naturaleza única, compleja y dinámica; un manejo adecuado del lodo garantiza una disposición segura. Sin embargo, si el lodo no recibe el tratamiento o higienización adecuados, podría representar riesgos para la salud pública debido a la presencia de metales y patógenos (Appels et al., 2008). A nivel internacional, se está promoviendo activamente la generación de energía a partir del biogás con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Se destaca la cogeneración de electricidad y calor, también conocida como CHP (Combined Heat and Power), que puede ser empleada en diversas aplicaciones, como el secado térmico del lodo. Además de contribuir a la reducción de emisiones de metano y sulfuro de hidrógeno a la atmósfera, el uso de biogás en estaciones de tratamiento de aguas residuales se presenta como una alternativa energética clave que podría liderar el sector del saneamiento hacia un desarrollo más sostenible, socialmente justo, ambientalmente responsable y económicamente viable (Van Haandel et al., 2019).

Autores como Possetti et al. (2021) proponen alternativas para el tratamiento de subproductos con el objetivo de mitigar los impactos ambientales, mediante el uso de herramientas

tecnológicas que permitan estimar teóricamente la producción de biogás por unidad de UASB, así como su posible aprovechamiento en la generación de energía eléctrica o térmica para el secado de lodo. Esto se lleva a cabo con el propósito de reducir los costos energéticos y económicos asociados. Según Appels et al. (2008), el lodo generado por los reactores UASB, aunque constituye solo alrededor del 1% al 2% del volumen total de aguas residuales domésticas tratadas, puede representar entre el 20% y el 60% de los costos operativos de una planta de tratamiento de aguas residuales, lo que subraya la importancia de abordar esta área para lograr mejoras significativas.

A nivel local, la empresa encargada de prestar servicios de acueducto, alcantarillado y servicios complementarios cuenta con un sistema completo de tratamiento de aguas residuales municipales. Este sistema comprende varias etapas, comenzando con un tratamiento preliminar, seguido de un tratamiento primario. Luego, se lleva a cabo un tratamiento secundario, el cual se basa en la digestión anaerobia mediante el uso de reactores UASB, así como un sistema de lodos activados. Finalmente, el agua tratada se dirige a un sedimentador secundario para obtener un efluente clarificado. Por otro lado, las líneas de tratamiento de subproductos realizan procesos especialmente en el caso de los biosólidos. Los lodos aerobios son sometidos a un proceso de espesamiento, mientras que los lodos anaerobios son tratados mediante una centrífuga y son llevados a disposición final. En lo que respecta al biogás, no se lleva a cabo ningún tratamiento adicional.

Expuesto lo anterior, es crucial explorar alternativas que permitan el aprovechamiento de los subproductos, ofreciendo una solución energética a los desafíos de los costos operativos a largo plazo. El aumento en la prestación del servicio puede impactar no solo a la empresa encargada del mismo, sino también a las entidades gubernamentales y, en última instancia, a los usuarios. Sin embargo, esto puede evitarse al introducir el concepto de economía circular, lo que representa una oportunidad para implementar enfoques que reduzcan los costos energéticos asociados con la aireación extendida o la higienización de lodos para su utilización en diversos fines como biosólidos. Autores como Lobato y Chernicharo han presentado propuestas en esta línea, destacando la importancia de adoptar estrategias que promuevan la sostenibilidad y la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Esto promueve una nueva cultura y competencia en el campo al identificar escenarios óptimos para mitigar impactos y disminuir la producción de residuos, con el objetivo de incorporarlos en ciclos productivos.

La relevancia de esta investigación radica en la presentación del nuevo paradigma ofrecido

por la economía circular en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Este enfoque conlleva beneficios económicos al reducir los costos operativos de la estación mediante la utilización de los subproductos en el contexto del municipio de Tunja, dado que se trata de un sistema tan completo, representa una oportunidad para convertirse en una estación sostenible de tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, durante el desarrollo de esta investigación, se explorarán las principales alternativas y se evaluará su aplicación en el tratamiento de subproductos que pueden integrarse a la estación sostenible de tratamiento de aguas residuales del municipio.

La metodología utilizada es de tipo descriptiva con enfoque cuantitativo, en la cual se evaluará el potencial de aprovechamiento de los subproductos del reactor UASB. Esto se abordará mediante la recopilación y análisis de datos numéricos, específicamente en relación con la concentración de materia orgánica, la producción volumétrica de lodo y biogás. Para llevar a cabo esta evaluación, se tomaron muestras simples. Con esta información, se estima teóricamente el potencial de estos subproductos para su aprovechamiento en forma de energía térmica o eléctrica, utilizando herramientas computacionales como el software Étsus v.01 y las ecuaciones del modelo de Lobato. De esta manera, se podrá evaluar y calcular la viabilidad de aprovechamiento de estos subproductos.

Es importante destacar que la información recopilada permite la creación de escenarios de aprovechamiento, teniendo en cuenta niveles de incertidumbre en los cálculos, categorizados como peor, típico y mejor, según el enfoque propuesto por Lobato et al. (2012). Considerando toda la información teórica presentada en este documento, se describe la metodología utilizada para estimar la cantidad de biogás de un reactor UASB. Con base en esto, se establece la cantidad de energía eléctrica y térmica que se puede obtener. Posteriormente, se cuantifica el lodo producido para determinar la energía requerida para el secado térmico. Finalmente, se presenta una propuesta en la cual se consideran dos posibles escenarios de aprovechamiento de subproductos, que incluyen deshidratación mecanizada, secado térmico y estabilización alcalina. Estos subproductos pueden ser utilizados en usos agrícolas, de acuerdo con los criterios establecidos en el Decreto 1287 del 2014, y se puede determinar su uso mediante una relación basada en datos históricos y valores de aceptabilidad de cada proceso.

En Tunja la entidad responsable de los servicios de acueducto, alcantarillado y servicios complementarios gestiona un sistema completo de tratamiento de aguas residuales municipales.

Comprendiendo un tratamiento preliminar a través de rejillas automáticas, seguido de un tratamiento primario en un desarenador. Luego, se lleva a cabo un tratamiento secundario que incluye la digestión anaerobia en reactores UASB y lodos activados. Finalmente, el agua se dirige a un sedimentador secundario.

## **Estimación de la producción de biogás en el reactor UASB de la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja considerando su potencial de aprovechamiento**

Este capítulo describe una fase preliminar que incluyó un análisis teórico de los sistemas de digestión anaerobia conocidos como reactores UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket), los cuales generan subproductos considerados valiosos recursos para la generación de energía o insumos agrícolas. Esta perspectiva se presenta en el modelo de aprovechamiento de subproductos de los sistemas anaerobios propuesto por Chernicharo y Lobato. Dicho modelo consiste en estimar teóricamente la cantidad de biogás que puede generar un reactor UASB, ya que uno de los principales objetivos de reutilizar el biogás es la generación de energía eléctrica. Esta estimación es crucial para diseñar la estructura del tratamiento. Asimismo, la producción de lodo es información esencial para el diseño de los sistemas de tratamiento de lodos. Para realizar estas estimaciones, se requirieron datos de entrada obtenidos de las caracterizaciones de agua residual. Por lo tanto, esta etapa del proyecto incluyó la toma de muestras simples y compuestas en puntos de interés, los cuales se describirán a lo largo de este documento.

### **Metodología del modelo de Lobato**

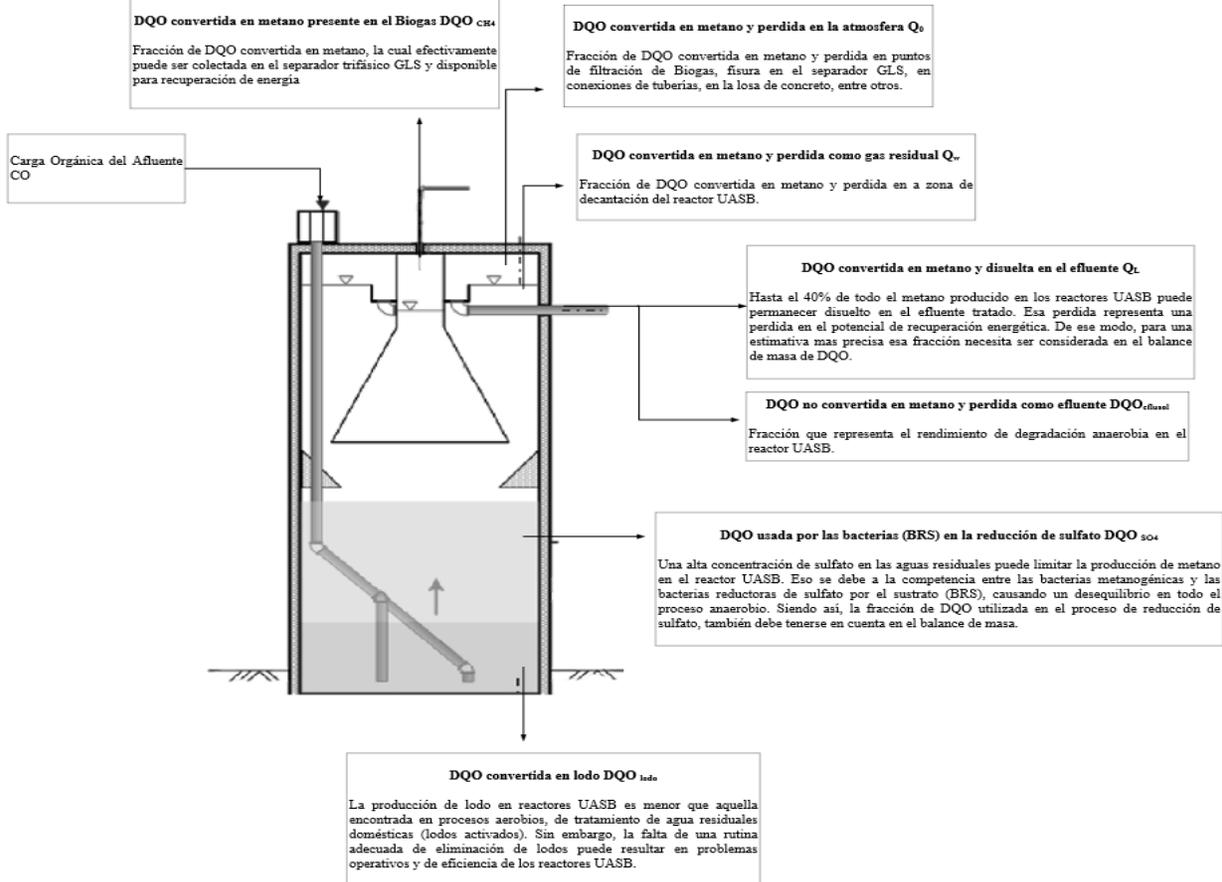
Los altos costos y la falta de disponibilidad de equipos de medición en la mayoría de las estaciones de tratamiento de aguas residuales llevan a basar la cuantificación inicial de la producción de biogás en modelos matemáticos. Sin embargo, estudios indican que estos modelos tienden a sobreestimar la producción de biogás al no considerar todas las rutas de conversión de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y las posibles pérdidas de metano ( $\text{CH}_4$ ) en los reactores UASB. Esto puede conducir a incertidumbres en la viabilidad técnica y económica de los proyectos de aprovechamiento energético del biogás en las estaciones de tratamiento, así como a un dimensionamiento incorrecto de los equipos de aprovechamiento energético Silva et al. (2014).

En este contexto, con el propósito de disminuir las incertidumbres técnicas asociadas a las estimaciones de producción de biogás en reactores UASB, se empleó el programa computacional de estimación de producción de biogás en reactores UASB, conocido como ProBio 1.0. Este software está fundamentado en el modelo matemático propuesto por Lobato et al. (2012) el cual usa el balance de masas para las rutas de conversión de DQO (ver figura 1), teniendo en cuenta

todas las pérdidas asociadas, siendo una parte fundamental para comprender los procesos metabólicos involucrados en la degradación de la materia orgánica en los reactores UASB, así como para una estimación de la producción de biogás y del potencial energético aprovechable.

**Figura 1**

*Rutas de conversión de DQO y flujos de metano en reactores UASB*



Fuente: Possetti., G., Rietow, C., Lobato, L., Mansur, M., y Chernicharo, L. (2021) Valoração e Gerenciamento de Subprodutos Gasosos Do Tratamento Do Esgoto. Parte A: Avanços Nas Ferramentas e Técnicas Para Estimativas de Produção e Tratamento de Biogás Em ETEs Com Reatores Anaeróbios. *Cadernos Técnico Eng Sanit Ambient*, (10).

Las principales características de este modelo son:

- Realización de estimaciones de producción de biogás, considerando todas las rutas de conversión de la materia orgánica y las posibles pérdidas involucradas en el proceso.
- Estimación del potencial de generación de energía a partir del aprovechamiento del biogás.
- Realización de la estimación de la producción de lodo en el reactor UASB, lo que permite

verificar y definir los criterios de deshidratación, secado térmico y aprovechamiento térmico del lodo seco.

- Incorporación de la variable de recuperación del metano disuelto en medio líquido, lo que permite estimar la recuperación de este gas y su potencial incremento energético del biogás.

**Tabla 1**

*Datos de entrada*

Caudal medio de agua residual afluyente	60 L/s
Concentración de DQO afluyente	478 g/m <sup>3</sup>
Coefficiente de producción de metano $Y_{CH_4}$	0.13 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg DQO
Poder calorífico del metano, $LCV_{CH_4}$	9.9 kWh/m <sup>3</sup>
Coefficiente de producción de lodo en DQO, $Y_{lodo}$	0.15 kg ST/ kg DQO
Densidad del lodo, $\gamma$	1020 kg ST/m <sup>3</sup>
Concentración de ST del lodo removido del reactor UASB, $C_{lodo-UASB}$	4%
Concentración de ST del lodo después de la centrífuga, $C_{lodo-centrifuga}$	20%
Concentración de ST del lodo después del secado térmico $C_{lodo-secador}$	80%
Captura de sólidos en la centrífuga, $SC_{centrifuga}$	90%
Captura de sólidos en el secador térmico $SC_{secador}$	100%
Eficiencia eléctrica de los motores Calor Energía Combinada (CHP), $\eta_E$	35%
Relación entre el calor contenido en los gases de escape y la energía total del combustible (biogás) consumido por el motor de combustión interna, $R_{escape}$	25%
Eficiencia térmica del secador térmico, $\eta_{te-secado}$	80%
Energía necesaria para evaporar 1 kg de agua, $E_{evap}$	1,0 kWh

Fuente: Possetti., G., Rietow, C., Lobato, L., Mansur, M., y Chernicharo, L. (2021) Valoração e Gerenciamento de Subprodutos Gasosos Do Tratamento Do Esgoto. Parte A: Avanços Nas Ferramentas e Técnicas Para Estimativas de Produção e Tratamento de Biogás Em ETEs Com Reatores Anaeróbios. Cadernos *Técnico Eng Sanit Ambient*, (10).

Los datos de entrada necesarios para llevar a cabo la estimación de la producción de biogás en ProBio se presentan en la Tabla 1. Debido a la necesidad de una cantidad significativa de datos de entrada, que no siempre están disponibles, el modelo ha establecido una serie de valores predefinidos para facilitar el proceso de estimación. Estos valores se han extraído de literatura especializada y se presentan de acuerdo con los tres escenarios de estimación considerados, los mismos adoptados por Lobato et al. (2012), que resultan en diferentes potenciales de aprovechamiento energético, a saber:

1. Peor escenario: aguas residuales más diluidas, con mayor concentración de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), menor eficiencia de remoción de DQO y mayores índices de pérdida de  $\text{CH}_4$ , lo que resulta en un menor potencial energético.
2. Mejor escenario: aguas residuales más concentradas, con menor concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ , alta eficiencia de remoción de DQO y menores índices de pérdida de  $\text{CH}_4$ , lo que resulta en un mayor potencial energético del biogás.
3. Escenario típico: la estimación se realiza considerando valores intermedios entre el peor y el mejor escenario.

Además, ofrece estimaciones de dos maneras, a través de un análisis rápido, donde el usuario solo necesita ingresar la población o el caudal de aguas residuales afluentes y seleccionar el escenario a evaluar. Para los demás datos de entrada, el programa utiliza los valores predeterminados; otra opción es el análisis detallado, en el cual el usuario puede ingresar datos reales de mediciones de entrada o utilizar los valores predeterminados para cada uno de los datos de entrada. A partir de esta información, el programa proporciona los siguientes resultados:

1. Balance de cargas orgánicas, producción de  $\text{CH}_4$  y biogás.
2. Pérdidas normalizadas de  $\text{CH}_4$  y energía.
3. Potencial de generación de energía.
4. Relaciones volumétricas.
5. Cargas energéticas y unitarias.
6. Deshidratación y secado térmico del lodo producido.
7. Recuperación del  $\text{CH}_4$  disuelto.
8. Escenarios de aprovechamiento energético del biogás y del lodo seco.

El último método es el utilizado para realizar las estimaciones de biogás y producción de lodo para el desarrollo de esta investigación. Para esto se emplea una hoja de cálculo en Excel

programada por el autor con las ecuaciones del modelo que corresponden también a las empleadas en el software, usando los datos de entrada y los valores predefinidos en el modelo de Lobato et al. (2012), modificado por Possetti et al. (2021) ver anexo C. Producción de biogás y lodo en reactores UASB. Es importante mencionar que dentro de este mismo documento se evalúa el diseño del reactor UASB empleando la herramienta computacional Étsus v.01.

### ***Fase 1. Cuantificación de Biogás***

Para llevar a cabo una estimación teórica del biogás utilizando la metodología del modelo de Lobato et al. (2012) modificado por Possetti et al. (2021), se requiere información básica como el caudal de diseño o el caudal de operación que entra en la unidad de tratamiento, así como la concentración de DQO en el afluente del reactor UASB. Por lo tanto, se inició la subfase 1 con la toma de muestras simples semanalmente durante un mes. Se recopiló información de los puntos de muestreo correspondientes al módulo 1 de la estación de tratamiento (ver figura 2), incluyendo el afluente, el efluente del reactor UASB y el efluente de la estación. Se pueden consultar evidencias fotográficas en el Anexo B.

Con el objetivo de contar con otro punto de referencia que se trabajó bajo condiciones similares, se recolectaron muestras de la estación de tratamiento del municipio de Samacá (ver figura 3). Esto permitirá comparar otro posible escenario de aprovechamiento en función de las condiciones operativas del sistema de tratamiento. Es importante destacar que, en este caso, se tomaron exclusivamente muestras simples en los mismos puntos de interés mencionados anteriormente.

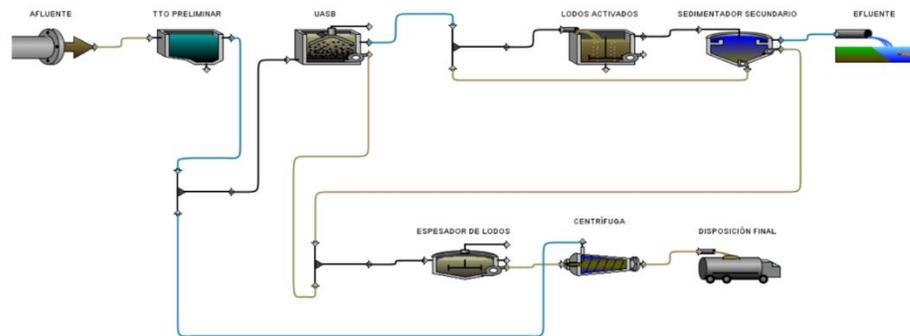
A medida que se recolectaban estas muestras, se llevaba a cabo simultáneamente la subfase 2 de este proyecto. En esta etapa, se realizaron los análisis fisicoquímicos correspondientes en el laboratorio de análisis ambiental de la Universidad de Boyacá. Se llevaron a cabo caracterizaciones del agua residual, incluyendo el procesamiento de muestras para determinar las concentraciones de DQO, DBO a siete días, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total kendahl, alcalinidad total, sólidos suspendidos totales y volátiles, tanto en muestras crudas como en muestras filtradas con filtro de 0.45  $\mu\text{m}$ . Es importante mencionar que se presentaron algunas dificultades para realizar la prueba de la demanda biológica de oxígeno (DBO) debido a problemas técnicos con el equipo de digestión durante el período en que se tomaron las muestras. Por lo tanto,

no se dispone de información de todas las muestras en este aspecto. Sin embargo, se puede establecer una relación con los datos de DQO.

Todos estos procedimientos se llevaron a cabo siguiendo los estándares establecidos según el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th Edition” cuyo objetivo es aplicar un protocolo de estandarización experimental para obtener los valores de los parámetros que servirán como criterios de confianza del método analítico, incluyendo exactitud, precisión, linealidad, límite de detección, sensibilidad y porcentaje de recuperación. Los resultados de estas mediciones se presentan en las tablas siguientes. Ver tablas 2 y 3.

## Figura 2

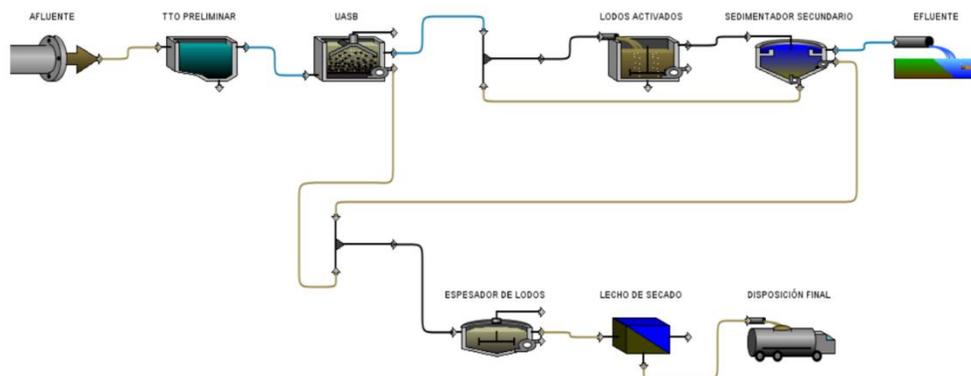
*Esquema del sistema de tratamiento del municipio de Tunja*



Fuente: Autor

## Figura 3

*Esquema del sistema de tratamiento del municipio de Samacá*



Fuente: Autor

**Tabla 2***Resultados de las caracterizaciones de agua residual del municipio de Tunja*

		Parámetros											
# Muestra	Muestra	DBO mg/L	DQO mg/L	DQO 0.45 µm mg/L	Norg mg/L	NH <sub>3</sub> mg/L	NKT mg/L	Norg 0.45 µm mg/L	NH <sub>3</sub> 0.45 µm mg/L	NKT 0.45 µm mg/L	ALC T mg/L	SSV mg/L	SST mg/L
1	Afluente UASB		521	163	5.3	20.8	26.1	3.4	25.2	28.6	156.0	244.0	436.0
	Efluente UASB		185.8	146.0	3.4	15.7	19.0	3.9	14.0	17.9	98.5	16.0	34.7
	Efluente PTAR		81	79	1.7	14	15.7	3.0	9.5	12.5	135.0	2.0	4.0
2	Afluente UASB	463	712.0	552.0	3.9	21.3	25.2	1.1	18.5	19.6	94.0	253.0	272.6
	Efluente UASB	61	174.0	106.0	2.2	17.9	20.2	1.7	17.4	19.0	108.0	11.0	14.0
	Efluente PTAR	15	126.0	103.0	1.1	15.1	16.2	1.7	13.4	15.1	76.0	8.0	12.0
3	Afluente UASB	387	714.0	291.0	10.0	31.0	41.0	3.4	25.2	28.6	124.0	244.0	316.0
	Efluente UASB	39	224.0	169.0	3.9	14.0	17.9	3.4	9.5	12.9	108.0	103.8	187.0
	Efluente PTAR	18	102.0	74.0	2.8	11.0	13.8	1.7	7.4	9.1	86.0	12.0	27.0
4	Afluente UASB		936.0	603.0	3.4	24.1	27.4	2.2	21.8	24.1	90.0	200.0	222.0
	Efluente UASB		210.0	154.0	2.2	18.5	20.7	1.7	16.8	18.5	102.0	22.0	76.0
	Efluente PTAR		117.0	85.0	1.7	16.8	18.5	1.1	15.1	16.2	92.0	4.0	13.0
5	Afluente UASB	447	712.0	533.0	3.4	25.8	29.1	1.7	24.1	25.8	92.0	612.3	824.3
	Efluente UASB	61	238.0	105.0	2.2	20.7	23.0	1.1	17.9	19.0	104.0	235.0	405.2
	Efluente PTAR	17	140.0	98.0	1.7	16.2	17.9	1.1	14.0	15.1	84.0	6.0	22.0
6	Afluente UASB		332.0	148.0	5.6	21.3	26.9	4.5	19.0	23.5	64.0	612.3	824.3
	Efluente UASB		121.0	100.0	3.4	18.5	21.8	1.7	16.8	18.5	80.0	235.0	405.2
	Efluente PTAR		113.0	89.0	2.2	16.2	18.5	1.1	14.0	15.1	74.0	5.0	8.0

Fuente: Autor

**Tabla 3***Resultados de las caracterizaciones del municipio de Samacá*

# Muestra	Muestra	Parámetros											
		DBO mg/L	DQO mg/L	DQO 0.45 $\mu$ m mg/L	Norg mg/L	NH <sub>3</sub> mg/L	NKT mg/L	Norg 0.45 $\mu$ m mg/L	NH <sub>3</sub> 0.45 $\mu$ m mg/L	NKT 0.45 $\mu$ m mg/L	ALC T mg/L	SSV mg/L	SST mg/L
1	Afluente UASB	-	651.0	228.0	35.8	39.2	75.0	-	-	-	658.0	118.0	127.0
	Efluente UASB	-	448.0	243.0	20.7	16.8	37.5	-	-	-	1000.0	43.3	78.7
	Efluente PTAR	-	111.0	68.0	0.0	16.8	16.8	-	-	-	204.0	51.7	57.7
2	Afluente UASB	-	754.0	330.0	-	-	-	-	-	-	74.0	175.3	220.7
	Efluente UASB M1	-	274.0	106.0	-	-	-	-	-	-	56.0	26.7	32.0
	Efluente UASB M2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	166.0	60.7	68.0
3	Sedimentador M1	-	101.0	76.0	-	-	-	-	-	-	46.0	16.7	20.0
	Sedimentador M2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.0	1.3	5.3
	Afluente UASB	-	474.0	162.0	9.0	16.2	25.2	3.4	12.9	16.2	92.0	120.0	178.0
4	Efluente UASB M1	-	266.0	96.0	5.6	23.5	29.1	3.9	19.0	23.0	116.0	16.0	54.0
	Efluente UASB M2	-	442.0	389.0	6.2	19.0	25.2	3.4	16.2	19.6	116.0	34.0	98.0
	Sedimentador M1	-	64.0	60.0	3.9	7.8	11.8	2.8	6.2	9.0	26.0	10.0	16.0
5	Sedimentador M2	-	67.0	60.0	3.4	4.5	7.8	1.7	2.8	4.5	8.0	10.0	20.0
	Afluente UASB	-	1401.0	652.3	8.4	15.7	24.1	2.2	13.4	15.7	70.0	120.0	178.0
	Efluente UASB M1	-	579.1	603.4	5.0	26.9	31.9	3.4	23.5	26.9	40.0	16.0	54.0
6	Efluente UASB M2	-	132.6	132.1	4.5	10.1	14.6	2.8	6.7	9.5	128.0	34.0	98.0
	Sedimentador M1	-	1007.6	506.9	2.8	6.7	9.5	1.7	6.7	8.4	164.0	10.0	16.0
	Sedimentador M2	-	188.7	144.5	2.2	23.5	25.8	1.1	3.9	5.0	6.0	10.0	20.0
7	Afluente UASB	-	892.0	353.0	3.4	15.7	19.0	2.2	12.9	15.1	96.0	332.0	428.6
	Efluente UASB M1	-	519.0	388.0	1.7	14.6	16.2	1.1	11.8	12.9	110.0	108.0	120.0
	Efluente UASB M2	-	545.0	280.0	2.2	14.0	16.2	1.1	11.8	12.9	104.0	96.0	100.0
8	Sedimentador M1	-	98.0	67.0	3.4	4.5	7.8	1.1	1.7	2.8	30.0	36.0	42.0
	Sedimentador M2	-	80.0	63.0	2.8	12.3	15.1	0.6	1.7	2.2	4.0	66.0	88.0
	Afluente UASB	-	1013.0	391.0	2.2	21.3	23.5	1.1	13.4	14.6	88.0	230.0	352.0
9	Efluente UASB M1	-	517.0	304.0	2.8	25.2	28.0	1.7	23.0	24.6	170.0	50.0	122.0
	Efluente UASB M2	-	551.0	297.0	3.9	21.3	25.2	2.2	20.2	22.4	156.0	48.0	108.0
	Sedimentador M1	-	68.0	49.0	3.4	4.5	7.8	1.7	2.8	4.5	48.0	2.0	8.0
10	Sedimentador M2	-	79.0	51.0	2.8	3.4	6.2	1.7	2.2	3.9	24.0	6.0	32.0

Fuente: Autor

La Tabla 2 muestra los parámetros operativos medidos del sistema afluente, el efluente UASB y el efluente ETAR del módulo 1 de la estación de tratamiento de agua residual. Se conoce además que el caudal operativo del módulo varía entre 35 L/s y 45 L/s, con una composición que es coherente con las características de aguas residuales de tipo doméstico, que van desde moderadamente a altamente concentradas (Metcalf y Eddy 2014). Estos resultados indican que, en líneas generales, los sistemas de tratamiento están funcionando dentro de los rangos típicos de los sistemas anaerobios en términos de las concentraciones de DQO en la entrada y la remoción de materia orgánica. Esto se evidencia a través del cálculo de la eficiencia de remoción.

**Eficiencia para remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos en el reactor UASB del módulo 1 de la estación de tratamiento del municipio de Tunja.** El promedio de las concentraciones de DQO que ingresan al reactor fue de 655 mg/L y en el efluente de 192.1 mg/L, mientras que el valor promedio para la DBO<sub>7</sub> es de 432 mg/L y 56.3 mg/L respectivamente, en cuanto a los sólidos suspendidos totales la concentración media en el afluente es de 482.3 mg/L y para el efluente de 187 mg/L. Estos datos se utilizaron para estimar la eficiencia del sistema anaerobio del módulo en estudio.

- Estimación de la eficiencia de remoción de DQO del sistema

$$E_{DQO} = 48 * THR^{0.14}$$

$$E_{DQO} = 48 * 10^{0.14} = 66\%$$

- Estimación de eficiencia de remoción de DBO del sistema

$$E_{DBO} = 49.2 * THR^{0.18}$$

$$E_{DBO} = 49.2 * 10^{0.18} = 74\%$$

Estimación de la concentración DQO y de DBO en el efluente

La eficiencia del reactor se calcula teniendo en cuenta:

S: Concentración de la DQO en el efluente

S<sub>0</sub>: Concentración de la DQO en el afluente

$$S = S_0 - (E_{DQO} * S_0)$$

$$S = 655 - (0.66 * 655) = 222.7 \text{ mg/L}$$

S: Concentración de la DBO en el efluente

S<sub>0</sub>: Concentración de la DBO en el afluente

$$S = S_0 - (E_{DBO} * S_0)$$

$$S = 432 - (0.74 * 432) = 112.32 \text{ mg/L}$$

- Eficiencia de remoción de DQO del reactor

$$E_{DQO} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{DQO} = \frac{655 - 192.1}{655} * 100 = 70\%$$

- Eficiencia de remoción de DBO del reactor

$$E_{DBO} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{DBO} = \frac{432 - 56.3}{432} * 100 = 87\%$$

- Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales

$$E_{SST} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{SST} = \frac{483 - 187}{483} * 100 = 61\%$$

Evaluando la eficiencia del sistema anaerobio, se observa que es posible alcanzar los límites normativos colombianos (resolución 1096 del 2000; artículo 164) para la eficiencia de remoción de los parámetros como DQO (60% a 80%), la DBO<sub>5</sub> (65% a 80%) y los sólidos suspendidos (60% a 70%); esto indica que el reactor opera dentro de condiciones normales cumpliendo con sus objetivos de diseño; sin embargo, el efluente debe considerar un postratamiento para eliminar la materia orgánica remanente, los nutrientes y los patógenos. Además, el seguimiento operativo de parámetros como alcalinidad y nitrógeno indica que el proceso sigue las etapas correspondientes a la metanogénesis y acidogénesis de las bacterias para la remoción de la materia orgánica.

Con estos resultados se procede a utilizar una hoja de cálculo programada con las ecuaciones y los datos de entrada del modelo de Lobato et al. 2012 (ver anexo C. Estimación de la producción y el tratamiento de biogás para recuperación en ETAR reactores anaerobios). En la primera etapa, se estima teóricamente la producción de biogás introduciendo los datos de caudal de diseño del reactor proporcionados por los operarios de la estación y la DQO afluente obtenida de las caracterizaciones.

**Cuantificación de biogás.** Este proceso comienza con la cuantificación de las fracciones en el balance de masas de la DQO, como se muestra en la Tabla 4. Aquí, se estima la carga orgánica

que ingresa al reactor, la cual se divide en la masa de DQO removida, la DQO convertida en lodo y la DQO utilizada por los microorganismos para la reducción del sulfato. Además, se estima la DQO convertida en metano, lo que permite calcular la producción teórica volumétrica de metano. En este punto, se tienen en cuenta las posibles pérdidas de metano y se calcula la producción normalizada de metano, ajustándola a condiciones de referencia a 1 atmósfera y temperatura de  $^{\circ}0$  C. Con esta información, se estima la cantidad teórica de biogás producido por el reactor. Posteriormente, se calcula el potencial químico disponible de este gas para generar energía eléctrica y térmica.

Con los datos obtenidos de las caracterizaciones realizadas en la estación de tratamiento del municipio de Samacá, la cual cuenta con un sistema de tratamiento similar al de Tunja, comprendiendo desde el aliviadero de excesos, una estación de bombeo para el caudal de excesos, un canal de aproximación y cribado, una estación de bombeo para el caudal hacia la PTAR, un desarenador primario con cámara de distribución de caudales, reactores UASB, reactores de lodos activados, sedimentadores secundarios, un espesador de lodos y lechos de secado de lodos. Actualmente, este sistema opera con dos módulos en funcionamiento. Tal como se consignan en la Tabla 3, con dicha información se evalúa el comportamiento y los parámetros de operación del sistema de digestión anaerobia mediante el promedio de los datos de los módulos de tratamiento para los parámetros DQO y SST; para el módulo 1 la DQO afluente UASB fue de 864 mg/L y en el efluente de 433.9 mg/L, y para los sólidos suspendidos totales de 247.4 mg/L y 76.8 mg/L respectivamente, en el módulo 2 la DQO afluente UASB fue de 864 mg/L y en el efluente de 356.3 mg/L, y para los sólidos suspendidos totales de 247.4 mg/L y 88.3 mg/L en el mismo orden. La eficiencia de remoción de DQO del módulo 1 es 50% y la remoción de sólidos suspendidos totales fue de 68%; para el módulo 2 se obtuvieron eficiencias del 59% y 64% respectivamente. En comparación con Tunja (ver figura 4), no se evidencian diferencias significativas en cuanto a la remoción de material suspendido, ya que en ambos casos cumple con lo establecido en la normativa colombiana para sistemas anaerobios (Resolución 1096 del 2000). Sin embargo, el parámetro de DQO no alcanza el límite mínimo establecido (eficiencia de remoción entre el 60% y el 80%). Esto podría atribuirse al poco tiempo de operación del sistema en el momento de la toma de muestras, indicando que se encontraba en su etapa inicial de funcionamiento.

- Eficiencia de remoción de DQO del módulo 1

$$E_{DQO} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{DQO} = \frac{864 - 433.9}{864} * 100 = 50\%$$

- Eficiencia de remoción de DQO del módulo 2

$$E_{DQO} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{DQO} = \frac{864 - 356.3}{864} * 100 = 59\%$$

- Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales del módulo 1

$$E_{SST} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{SST} = \frac{247.4 - 76.8}{274.4} * 100 = 68\%$$

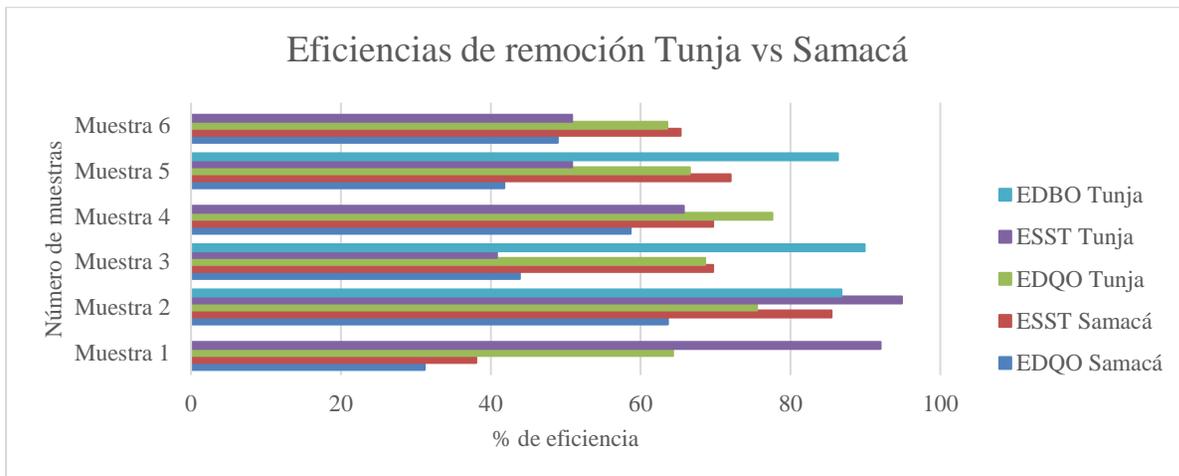
- Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales del módulo 2

$$E_{SST} = \frac{[ ]_{Entrada} - [ ]_{Salida}}{[ ]_{Entrada}} * 100$$

$$E_{SST} = \frac{247.4 - 88.3}{274.4} * 100 = 64\%$$

**Figura 4**

*Eficiencias de remoción de los sistemas de Tunja y Samacá*



Fuente: Autor.

**Tabla 4**

*Ecuaciones para el cálculo de las fracciones en el balance de masas de DQO y del potencial de recuperación de energía*

Fracciones	Ecuaciones	Observaciones
Carga orgánica entrando al reactor	$CO = Q_{\text{medio}} * DQO_{\text{afluente}}$	CO: Carga orgánica del afluente DQO <sub>afluente</sub> : concentración de DQO total en el efluente
Masa diaria de DQO removida	$DQO_{\text{rem}} = CO * E_{DQO}$	DQO <sub>rem</sub> : masa diaria de DQO removida en el sistema E <sub>DQO</sub> : eficiencia de remoción de DQO, de acuerdo al escenario es peor (60%), típico (65%), mejor (70%). Nota: DQO <sub>afluente</sub> variando entre concentraciones de 180 mg/L DQO a 1000 mg/L DQO, temperatura entre 20°-30°.
Masa de DQO convertida en lodo	$DQO_{\text{lodo}} = DQO_{\text{rem}} * Y * K_{\text{STV-lodo}}$	Y: Coeficiente de producción de sólidos en el sistema. De acuerdo al escenario es Peor: (0.25 kg STV/kg DQO <sub>rem</sub> ) Típico: (0.20 kg STV/kg DQO <sub>rem</sub> ) Mejor: (0.15 kg STV/kg DQO <sub>rem</sub> ) K <sub>STV-lodo</sub> : Factor de conversión de STV a DQO lodo, 1.42 kg DQO-lodo/ kg STV
Carga de sulfato convertida en sulfuro	$CO_{\text{SO}_4^{-2}} = Q_{\text{med}} * C_{\text{SO}_4^{-2}} * E_{\text{SO}_4^{-2}}$	C <sub>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></sub> : Concentración de sulfatos en el afluente Para DQO > 500 mg/L Escenarios Peor: 0.08 kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /m <sup>3</sup> Típico: 0.06 kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /m <sup>3</sup> Mejor: 0.04 kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /m <sup>3</sup>
Masa diaria de DQO usada en la reducción del sulfato	$DQO_{\text{SO}_4^{-2}} = CO_{\text{SO}_4^{-2}} * K_{\text{DQO-SO}_4^{-2}}$	Para DQO ≥ 180 mg/L y ≤ 500 mg/L Escenarios Peor: 0.02 kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /m <sup>3</sup> Típico: 0.015 kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /m <sup>3</sup> Mejor: 0.01 kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /m <sup>3</sup>
Masa diaria de DQO convertida en metano	$DQO_{\text{CH}_4} = DQO_{\text{rem}} - DQO_{\text{lodo}} - DQO_{\text{SO}_4^{-2}}$ $Q_{\text{CH}_4} = \frac{DQO_{\text{CH}_4} * R * (273 + T)}{P * K_{\text{CH}_4} * 1000}$	E <sub>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></sub> : Eficiencia de remoción de los sulfatos, para cada escenario se tiene: peor (80%), típico (75%), mejor (70%) K <sub>DQO-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></sub> : DQO consumida en la reducción de los sulfatos, 0.667 kg DQO/kg SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> R: Constante de los gases ideales, 0.08206 atm*L/mol*°K T: Temperatura operacional del reactor, 20°C P: Presión atmosférica (Tunja), 0.7 atm, K <sub>CH<sub>4</sub></sub> : DQO correspondiente a un mol de metano, 0.064 kg DQO/mol CH <sub>4</sub>
Estimación de las pérdidas de metano	$Q_w = Q_{\text{CH}_4} * \rho_w$	Q <sub>w</sub> : metano perdido en la fase gaseosa como gas residual

	$Q_0 = Q_{CH_4} * \rho_0$ $Q_L = Q_{CH_4} * \rho_L$	<p><math>\rho_w</math>: Pérdida de metano en la fase gaseosa zona de sedimentación, escenarios peor (7.5%), típico (5.0%), mejor (2.5%)</p> <p><math>Q_0</math>: Otras Pérdidas de metano (fisuras GLS, tuberías y otros)</p> <p><math>\rho_0</math>: Otras Pérdidas de metano en la fase gaseosa, escenarios peor (7.5%), típico (5.0%), mejor (2.5%)</p> <p><math>Q_L</math>: Pérdida de metano en la fase líquida</p> <p><math>\rho_L</math>: Pérdida de metano en la fase líquida, escenarios peor (40%), típico (30%), mejor (20%)</p>
Producción normalizada de metano	$Q_{REAL-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_w - Q_0 - Q_L$ $Q_{N-REAL-CH_4} = \frac{Q_{REAL-CH_4} * 273}{273 + T}$	<p><math>Q_{REAL-CH_4}</math>: Producción normalizada de metano</p> <p><math>Q_{N-REAL-CH_4}</math>: Estimación de la producción real y normalizada de metano a 1 atm, 0 °C</p>
Producción de Biogas	$Q_{biogas} = \frac{Q_{N-REAL-CH_4} * 100}{C_{CH_4}}$	<p><math>C_{CH_4}</math>: Contenido teórico del metano en el Biogas, escenarios peor (75%), típico (80%), mejor (85%)</p>
Potencial disponible químico		<p><math>E_{CH_4}</math>: potencial químico disponible, 9.9 kWh/Nm<sup>3</sup></p>
Generación de energía eléctrica y térmica	$PE_{Electrica} = PE_{REAL-CH_4} * \eta_E$ $PE_{Térmica} = PE_{REAL-CH_4} * \eta_T$	<p><math>PE_{ELECTRICA}</math>: Potencial de generación de energía eléctrica</p> <p><math>\eta_E</math>: eficiencia de conversión de potencial químico en energía eléctrica kWh/d, 35%</p> <p><math>PE_{TÉRMICA}</math>: Potencial de generación de energía térmica</p> <p><math>\eta_T</math>: eficiencia de conversión de potencial químico en energía térmica kWh/d, 79%</p>

Fuente: Lobato et al. (2012) citado por Possetti et al. (2021)

***Estimación de la producción de metano en el sistema de tratamiento (Escenarios Peor-Típico-Mejor).*** Se proporciona a continuación un ejemplo de cálculo utilizando los datos promedio de DQO obtenidos de las caracterizaciones de las muestras de VEOLIA Tunja.

- Cálculo del metano disuelto en el efluente:

DQO removida ( $DQO_{rem}$ )

$$DQO_{rem} = CO * E_{DQO}$$

Donde:

CO: Carga orgánica del afluente, se calcula de la siguiente forma

$$CO = Q_{medio} * DQO_{afluente}$$

$$CO = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.655 \text{ kg}/\text{m}^3 = 6792 \text{ kg DQO}/\text{d}$$

$E_{DQO}$ : eficiencia de remoción de DQO

Para cada escenario

Peor:

$$DQO_{rem} = 6792 * 0.6 = 4075 \text{ kg DQO}/\text{d}$$

Típico:

$$DQO_{rem} = 6792 * 0.65 = 4415 \text{ kg DQO}/\text{d}$$

Mejor:

$$DQO_{rem} = 6792 * 0.7 = 4754 \text{ kg DQO}/\text{d}$$

- Masa de DQO convertida en lodo:

$$DQO_{lodo} = DQO_{rem} * Y * K_{STV-lodo}$$

Donde:

Y: Coeficiente de producción de sólidos en el sistema (kg STV/kg DQO<sub>rem</sub>).

$K_{STV-lodo}$ : Factor de conversión de STV a DQO<sub>lodo</sub>, 1.42 kg DQO<sub>lodo</sub>/ kg STV

Para cada escenario

Peor:

$$DQO_{lodo} = 4075 \text{ kg DQO}/\text{d} * 0.25 * 1.42 \text{ kg SVT}/\text{DQO}_{lodo}$$

$$DQO_{lodo} = 1447 \text{ kgDQO}/\text{d}$$

Típico:

$$DQO_{lodo} = 4415 \text{ kg DQO}/\text{d} * 0.20 * 1.42 \text{ kg SVT}/\text{DQO}_{lodo}$$

$$DQO_{lodo} = 1254 \text{ kgDQO}/\text{d}$$

Mejor:

$$DQO_{lodo} = 4754 \text{ kg DQO}/\text{d} * 0.15 * 1.42 \text{ kg SVT}/\text{DQO}_{lodo}$$

$$DQO_{lodo} = 1013 \text{ kgDQO}/\text{d}$$

- Carga orgánica de sulfato se calcula así:

$$CO_{SO_4^{-2}} = Q_{med} * C_{SO_4^{-2}} * E_{SO_4^{-2}}$$

Donde:

$C_{SO_4^{-2}}$ : Concentración de sulfatos en el afluente. (Tener en cuenta que la DQO < 500 mg/L)

$E_{SO_4^{-2}}$ : Eficiencia de remoción de los sulfatos.

Para cada escenario

Peor:

$$CO_{SO_4^{-2}} = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.02 \text{ kg}/\text{m}^3 * 0.8 = 664 \text{ kg}/\text{d}$$

Típico:

$$CO_{SO_4^{-2}} = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.015 \text{ kg}/\text{m}^3 * 0.75 = 467 \text{ kg}/\text{d}$$

Mejor:

$$CO_{SO_4^{-2}} = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.01 \text{ kg}/\text{m}^3 * 0.7 = 290 \text{ kg}/\text{d}$$

- Cálculo de la DQO empleada en la reducción del sulfato

$$DQO_{SO_4^{-2}} = CO_{SO_4^{-2}} * K_{DQO-SO_4^{-2}}$$

Donde:

$K_{DQO-SO_4}$ : DQO consumida en la reducción de los sulfatos, 0.667 kg DQO/kg  $SO_4^{-2}$

Para cada escenario

Peor

$$DQO_{SO_4^{-2}} = 664 \text{ kg}/\text{d} * 0.667 \text{ kg DQO}/\text{kg } SO_4^{-2} = 443 \text{ kg}/\text{d}$$

Típico

$$DQO_{SO_4^{-2}} = 467 \text{ kg}/\text{d} * 0.667 \text{ kg DQO}/\text{kg } SO_4^{-2} = 311 \text{ kg}/\text{d}$$

Mejor

$$DQO_{SO_4^{-2}} = 290 \text{ kg}/\text{d} * 0.667 \text{ kg DQO}/\text{kg } SO_4^{-2} = 193 \text{ kg}/\text{d}$$

- DQO convertida en metano

Para cada escenario

$$DQO_{CH_4} = DQO_{rem} - DQO_{lodo} - DQO_{SO_4^{-2}}$$

Peor

$$DQO_{CH_4} = 4075 \text{ kg DQO/d} - 1447 \text{ kgDQO/d} - 443 \text{ kg/d}$$

$$DQO_{CH_4} = 2185 \text{ kg/d}$$

Típico

$$DQO_{CH_4} = 4415 \text{ kg DQO/d} - 1255 \text{ kgDQO/d} - 311 \text{ kg/d}$$

$$DQO_{CH_4} = 2850 \text{ kg/d}$$

Mejor

$$DQO_{CH_4} = 4754 \text{ kg DQO/d} - 1013 \text{ kgDQO/d} - 193 \text{ kg/d}$$

$$DQO_{CH_4} = 3549 \text{ kg/d}$$

- Producción volumétrica teórica de metano

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} * R * (273 + T)}{P * K_{CH_4} * 1000}$$

Donde:

R: Constante de los gases ideales, 0.08206 atm\*L/mol\*°K.

T: Temperatura operacional del reactor, 20°C.

P: Presión atmosférica (Tunja) 0.7 atm.

K<sub>CH<sub>4</sub></sub>: DQO correspondiente a un mol de metano, 0.064 kg DQO/mol CH<sub>4</sub>.

Para cada escenario

Peor

$$Q_{CH_4} = \frac{2185 \frac{\text{kg}}{\text{d}} * 0.08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{°K}} * (273 + 20^\circ\text{C})}{0.7 \text{ atm} * 0.064 \frac{\text{kg DQO}}{\text{mol CH}_4} * 1000} = 1173 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{CH_4} = \frac{2850 \frac{\text{kg}}{\text{d}} * 0.08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{°K}} * (273 + 20^\circ\text{C})}{0.7 \text{ atm} * 0.064 \frac{\text{kg DQO}}{\text{mol CH}_4} * 1000} = 1530 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{CH_4} = \frac{3549 \frac{\text{kg}}{\text{d}} * 0.08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * ^\circ\text{K}} * (273 + 20^\circ\text{C})}{0.7 \text{ atm} * 0.064 \frac{\text{kg DQO}}{\text{mol CH}_4} * 1000} = 1905 \text{ m}^3/\text{d}$$

Estimación de las pérdidas de metano

- Estimación de metano en la fase gaseosa como gas residual

$$Q_w = Q_{CH_4} * \rho_w$$

Donde:

$\rho_w$ : Pérdida de metano en la fase gaseosa con gas residual.

Para cada escenario

Peor

$$Q_w = 1173 \text{ m}^3/\text{d} * 0.075 = 88 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_w = 1530 \text{ m}^3/\text{d} * 0.05 = 77 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_w = 1905 \text{ m}^3/\text{d} * 0.025 = 48 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Otras Pérdidas de metano en la fase gaseosa

$$Q_0 = Q_{CH_4} * \rho_0$$

Donde:

$\rho_0$ : Otras Pérdidas de metano en la fase gaseosa.

Para cada escenario

Peor

$$Q_0 = 1172 \text{ m}^3/\text{d} * 0.075 = 88 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_0 = 1530 \text{ m}^3/\text{d} * 0.05 = 76 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_0 = 1905 \text{ m}^3/\text{d} * 0.025 = 48 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Pérdida de metano en la fase líquida

$$Q_L = Q_{CH_4} * \rho_L$$

Donde:

$\rho_L$ : Pérdida de metano en la fase líquida.

Para cada escenario

Peor

$$Q_L = 1173 \text{ m}^3/\text{d} * 0.4 = 469 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_L = 1530 \text{ m}^3/\text{d} * 0.3 = 459 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_L = 1905 \text{ m}^3/\text{d} * 0.2 = 381 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Cálculo de la producción real de caudal de metano

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = Q_{CH_4} - Q_w - Q_o - Q_L$$

Para cada escenario

Peor

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = 1173 \text{ m}^3/\text{d} - 88 \text{ m}^3/\text{d} - 88 \text{ m}^3/\text{d} - 469 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = 528 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = 1530 \text{ m}^3/\text{d} - 76 \text{ m}^3/\text{d} - 76 \text{ m}^3/\text{d} - 458 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = 918 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = 1905 \text{ m}^3/\text{d} - 48 \text{ m}^3/\text{d} - 48 \text{ m}^3/\text{d} - 381 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{REAL-CH}_4} = 1429 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Estimación de la producción real y normalizada de metano a (1 atm, 0 °C)

$$Q_{\text{N-REAL-CH}_4} = \frac{Q_{\text{REAL-CH}_4} * 273}{273 + T}$$

Para cada escenario

Peor

$$Q_{N-REAL-CH_4} = \frac{528 \text{ m}^3/\text{d} * 273}{273 + 21^\circ\text{C}} = 492 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{N-REAL-CH_4} = \frac{918 \text{ m}^3/\text{d} * 273}{273 + 20^\circ\text{C}} = 855 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{N-REAL-CH_4} = \frac{1429 \text{ m}^3/\text{d} * 273}{273 + 21^\circ\text{C}} = 1331 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

- Producción normalizada de Biogas

$$Q_{\text{biogas}} = \frac{Q_{N-REAL-CH_4} * 100}{C_{CH_4}}$$

Donde:

$C_{CH_4}$ : Contenido teórico del metano en el Biogas.

Para cada escenario

Peor

$$Q_{\text{biogas}} = \frac{492 \text{ Nm}^3/\text{d} * 100}{75} = 656 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{\text{biogas}} = \frac{855 \text{ Nm}^3/\text{d} * 100}{80} = 1069 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{\text{biogas}} = \frac{1331 \text{ Nm}^3/\text{d} * 100}{85} = 1566 \text{ Nm}^3/\text{d}$$

- Estimación del potencial químico disponible

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = Q_{\text{N-REAL-CH}_4} * E_{\text{CH}_4}$$

Donde:

$E_{\text{CH}_4}$ : 9.9 kWh/Nm<sup>3</sup>, potencial químico disponible

Para cada escenario

Peor

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = 492 \text{ Nm}^3/\text{d} * 9.9 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = 4869 \text{ kWh/d}$$

Típico

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = 855 \text{ Nm}^3/\text{d} * 9.9 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = 8467 \text{ kWh/d}$$

Mejor

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = 1331 \text{ Nm}^3/\text{d} * 9.9 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$PE_{\text{REAL-CH}_4} = 13180 \text{ kWh/d}$$

- Estimación de energía eléctrica

$$PE_{\text{Electrica}} = PE_{\text{REAL-CH}_4} * \eta_E$$

Donde:

$\eta_E$ : 35% eficiencia de conversión de potencial químico en energía eléctrica kWh/d

Para cada escenario

Peor

$$PE_{\text{Electrica}} = 4869 \text{ kWh/d} * 0.35$$

$$PE_{\text{Electrica}} = 1704 \text{ kWh/d}$$

Típico

$$PE_{\text{Electrica}} = 8467 \text{ kWh/d} * 0.35$$

$$PE_{\text{Electrica}} = 2963 \text{ kWh/d}$$

Mejor

$$PE_{\text{Electrica}} = 13180 \text{ kWh/d} * 0.35$$

$$PE_{\text{Electrica}} = 4613 \text{ kWh/d}$$

- Estimación de energía térmica

$$PE_{\text{Térmica}} = PE_{\text{REAL-CH}_4} * \eta_T$$

Donde

$\eta_T$ : eficiencia de conversión de potencial químico en energía térmica kWh/d

Para cada escenario

Peor

$$PE_{\text{Térmica}} = 4869 \text{ kWh/d} * 0.79$$

$$PE_{\text{Térmica}} = 3847 \text{ kWh/d}$$

Típico

$$PE_{\text{Térmica}} = 8467 \text{ kWh/d} * 0.79$$

$$PE_{\text{Térmica}} = 6689 \text{ kWh/d}$$

Mejor

$$PE_{\text{Térmica}} = 13180 \text{ kWh/d} * 0.79$$

$$PE_{\text{Térmica}} = 10412 \text{ kWh/d}$$

En la Tabla 5 se presenta el consolidado de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para cada muestra, con el objetivo de estimar la cantidad teórica de biogás que puede producir el reactor del módulo 1 de la estación de tratamiento. Se muestran las distintas rutas de conversión de DQO en función de la carga orgánica que ingresa a la unidad de tratamiento, así como se contempla para cada muestra los escenarios (peor, típico, mejor), para este caso, la simulación se llevó a cabo con el caudal operativo que ingresa al reactor, reportado por los operarios de la estación, de 35 L/s.

**Tabla 5***Resultados estimación de Biogas de la estación de tratamiento del municipio de Tunja*

Muestra	Escenario	DQO <sub>rem</sub> Kg/d	DQO <sub>lodo</sub> Kg/d	DQO <sub>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></sub> Kg/d	DQO <sub>CH<sub>4</sub></sub> Kg/d	Q <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>w</sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>0</sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>L</sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>REAL-CH<sub>4</sub></sub> m <sup>3</sup> /d	Q <sub>N-REAL-CH<sub>4</sub></sub> Nm <sup>3</sup> /d	Q <sub>biogas</sub> m <sup>3</sup> /d	PE <sub>REAL-CH<sub>4</sub></sub> kWh/d	PE <sub>Electrica</sub> kWh/d	PE <sub>Termica</sub> kWh/d
1	Peor	946	336	129	481	258	19	19.4	103.2	116	108.1	144	1070	375	845
	Típico	1024.4	290.93	91	642	345	17	17.3	103.5	207	192.8	241	1909	668	1508
	Mejor	1103.2	235	57	811	435	11	10.9	87	326	303.9	358	3009	1053	2377
2	Peor	1292	459	129	704	378	28	28.4	151.2	170	158.4	211	1568	549	1239
	Típico	1399.5	397.46	91	911	489	25	24.5	146.7	293	273.3	342	2706	947	2138
	Mejor	1507.1	321	57	1129	606	15	15.2	121.2	454	423.4	498	4192	1467	3312
3	Peor	1295	460	129	706	379	28	28.4	151.6	171	159	212	1574	551	1243
	Típico	1403.4	398.57	91	914	491	25	24.6	147.3	295	274.4	343	2717	951	2146
	Mejor	1511.3	322	57	1132	608	15	15.2	121.6	456	424.9	500	4207	1472	3324
4	Peor	1154	410	129	615	330	25	24.8	132	148	138.3	184	1369	479	1082
	Típico	1250	355.00	91	804	431	22	21.6	129.3	259	240.9	301	2385	835	1884
	Mejor	1346.1	287	57	1002	538	14	13.5	107.6	403	375.9	442	3721	1302	2940
5	Peor	1297	460	129	708	380	29	28.5	152	171	159.3	212	1577	552	1246
	Típico	1405.3	399.11	91	915	491	25	24.6	147.3	295	274.4	343	2717	951	2146
	Mejor	1513.4	322	57	1134	609	15	15.2	121.8	457	425.6	501	4213	1475	3328
6	Peor	602	214	32	356	191	14	14.3	76.4	86	80.1	107	793	278	626
	Típico	652.6	185.34	23	444	238	12	11.9	71.4	143	133.1	166	1318	461	1041
	Mejor	702.8	150	14	539	289	7	7.2	57.8	217	202	238	2000	700	1580

Fuente: Autor.

Con base en esta información, se estima en promedio que la cantidad volumétrica de biogás disponible para cada escenario (peor, típico, mejor) es de 178.3 Nm<sup>3</sup>/d, 289.3 Nm<sup>3</sup>/d y 422.8 Nm<sup>3</sup>/d respectivamente. Con esto, se puede obtener un potencial energético recolectado en el GLS de 464.0 kWh/d, 802.2 kWh/d y 1244.8 kWh/d, o 1046.8 kWh/d, 1810.5 kWh/d y 2810.2 kWh/d para potencial de energía térmica. Estos resultados indican que el reactor UASB genera una cantidad significativa de biogás en comparación con las estadísticas de datos intermedios de simulaciones realizadas por (Souza et al., 2011), en promedio, el biogás generado en reactores UASB es de 205 Nm<sup>3</sup>/d. Teniendo este valor como referencia, se puede decir que la estimación teórica del biogás realizada se ajusta a las condiciones indicadas por Souza, resaltando que la unidad de tratamiento opera con eficiencias de remoción dentro de los parámetros normales, lo que corresponde a una operación adecuada del proceso mismo. Sin embargo, es importante tener en cuenta el estado actual de los reactores en la estación de tratamiento de agua residual, ya que presentan fisuras en el separador trifásico (GLS), lo cual ocasiona pérdidas de biogás.

Los resultados muestran que el biogás genera principalmente energía eléctrica, la cual puede utilizarse para la higienización del lodo de exceso. Además, con la cantidad de energía eléctrica generada se puede suplir un porcentaje de la energía requerida para el sistema o puede ser entregada a la red pública del municipio. Según (Nolasco, 2010), algunas estimaciones de estudios sugieren que el consumo de energía puede oscilar entre 0.5 y 1 kWh por metro cúbico de agua tratada. Es importante tener en cuenta que, dentro de una planta de tratamiento, los principales componentes que consumen la mayor cantidad de energía son la aireación o mezcla, las bombas y, para el manejo de lodos, las bombas centrífugas para deshidratación y la operación de filtros. Por lo tanto, el impacto energético puede variar dependiendo del sistema de tratamiento implementado, ya que cada uno de estos componentes puede tener una importancia diferente dentro de la matriz energética. En procesos totalmente aeróbicos, se estima que el consumo de energía para la aireación es de alrededor de 1 kW/kg DBO<sub>5</sub> removida. Este valor es altamente variable y depende del sistema de aireación utilizado (difusores de burbuja gruesa vs. difusores de poro fino), la ubicación de la planta (a mayor elevación sobre el nivel del mar, menor es la eficiencia de transferencia de oxígeno y, por ende, mayor el consumo eléctrico) y el tipo de tratamiento, esto se puede evidenciar con los datos de consumo energético de la estación de tratamiento de aguas residuales de Tunja, que se encuentran consignados en la tabla 6, en ella se registra el consumo mensual de energía por los tres módulos actualmente en operación.

**Tabla 6***Datos de consumo real de la ETAR de Tunja*

<b>Datos de consumo real de ETAR año 2023</b>	
<b>KWh/mes para 3 módulos</b>	
Enero	180652.00
Febrero	194242.00
Marzo	170083.00
Abril	151108.00
Mayo	164000.00
Junio	178781.00
Julio	150894.00
Agosto	144854.00
Septiembre	176755.00
Octubre	192227.00
Noviembre	193516.00
Diciembre	187203.00
Promedio	173692.92

Fuente: Autor.

**Tabla 7***Datos obtenidos de las simulaciones*

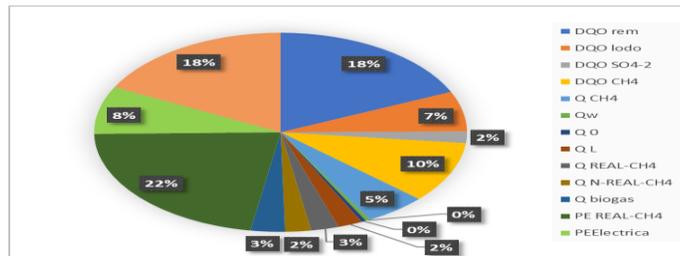
<b>Datos obtenidos de las simulaciones para 1 módulo Tunja</b>		
<b>Muestra</b>	<b>KWh/d Probio 1.0</b>	<b>KWh/mes</b>
1	668	20040.00
2	947	28410.00
3	951	28530.00
4	835	25050.00
5	951	28530.00
6	461	13830.00
Promedio		24065.00
Estimación para los 3 módulos		72195

Fuente: Autor.

Los resultados de la tabla 7 muestran la energía eléctrica disponible obtenida mediante el modelo para un módulo en el escenario típico, en comparación con el consumo promedio real de la estación de tratamiento se puede suplir aproximadamente el 14 % de la energía. Sin embargo, al hacer una estimación del potencial energético disponible de los tres módulos es posible suplir cerca del 42 % de la energía eléctrica en promedio. Este escenario resulta optimista y sugiere la posibilidad de recuperar un porcentaje significativo de los costos energéticos de los sistemas de la planta.

**Figura 5**

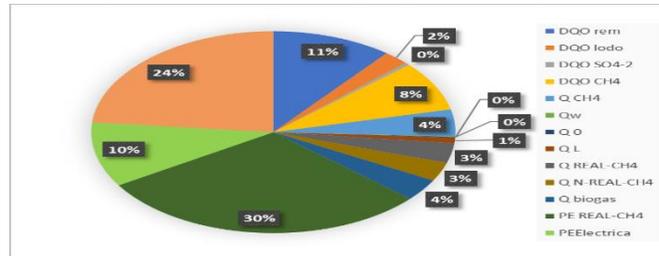
*Balance de masas de DQO y estimación de biogás para el peor escenario*



Fuente: Autor.

**Figura 7**

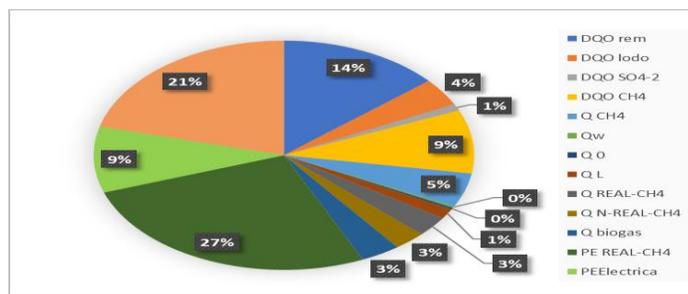
*Balance de masas de DQO y estimación de biogás para el mejor escenario*



Fuente: Autor.

**Figura 6**

*Balance de masas de DQO y estimación de biogás para el escenario típico*



Fuente: Autor.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las estimaciones realizadas para cada muestra, donde se reportó que el caudal de operación ingresando al reactor UASB fue de 18 L/s, sobre la base del cual se realizó la estimación.

**Tabla 8***Resultados estimación de Biogas de la estación de tratamiento del municipio de Samacá*

M	Escenario	DQO <sub>rem</sub>	DQO <sub>lodo</sub>	DQO <sub>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></sub>	DQO <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Q <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Q <sub>w</sub>	Q <sub>0</sub>	Q <sub>L</sub>	Q <sub>REAL-CH<sub>4</sub></sub>	Q <sub>N-REAL-CH<sub>4</sub></sub>	Q <sub>biogas</sub>	PE <sub>REAL-CH<sub>4</sub></sub>	PE <sub>Electrica</sub>	PE <sub>Termica</sub>
		Kg/d	Kg/d	Kg/d	Kg/d	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	Nm <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	kWh/d	kWh/d	kWh/d
1	Peor	607	215	67	325	174	13	13.1	69.6	78	72.9	97	722	253	570
	Típico	657.8	186.82	47	424	228	11	11.4	68.4	137	127.5	159	1262	442	997
	Mejor	708.4	151	29	529	284	7	7.1	56.8	213	198.5	234	1965	688	1552
2	Peor	704	250	67	387	208	16	15.6	83.2	94	87.2	116	863	302	682
	Típico	762.5	216.55	47	499	268	13	13.4	80.4	161	149.8	187	1483	519	1172
	Mejor	821.1	175	29	617	331	8	8.3	66.2	248	231.3	272	2290	802	1809
3	Peor	442	157	17	268	144	11	10.8	57.6	65	60.4	81	598	209	472
	Típico	479.1	136.06	11	332	178	9	8.9	53.4	107	99.5	124	985	345	778
	Mejor	515.9	110	7	399	214	5	5.4	42.8	160	149.5	176	1480	518	1169
4	Peor	1307	464	67	776	416	31	31.2	166.4	187	174.4	233	1727	604	1364
	Típico	1416.4	402.26	47	967	519	26	26	155.7	311	290.1	363	2872	1005	2269
	Mejor	1525.3	325	29	1171	628	16	15.7	125.6	471	438.8	516	4344	1520	3432
5	Peor	832	295	67	470	252	19	18.9	100.8	113	105.7	141	1046	366	826
	Típico	901.6	256.05	47	599	321	16	16.1	96.3	193	179.4	224	1776	622	1403
	Mejor	970.9	207	29	735	394	10	9.9	78.8	295	275.2	324	2724	953	2152
6	Peor	945	335	67	543	291	22	21.8	116.4	131	122.1	163	1209	423	955
	Típico	1023.8	290.76	47	686	368	18	18.4	110.4	221	205.7	257	2036	713	1608
	Mejor	1102.5	235	29	839	450	11	11.3	90	337	314.4	370	3113	1090	2459

Fuente: Autor

En relación con los datos obtenidos para el municipio de Samacá, se observa que para cada escenario (peor, típico, mejor), la cantidad volumétrica de biogás estimada es de 138.5 Nm<sup>3</sup>/d, 219 Nm<sup>3</sup>/d y 315.3 Nm<sup>3</sup>/d respectivamente. Con estas cantidades, el potencial energético disponible del biogás recolectado por el separador trifásico GLS es de 359.5 kWh/d, 607.7 kWh/d y 928.5 kWh/d, o 811.5 kWh/d, 1371.2 kWh/d y 2095.5 kWh/d en términos del potencial de energía térmica. Al comparar estos datos con los del sistema anterior, y teniendo en cuenta que el caudal de operación es menor en Samacá, se observa que son cifras cercanas que indican el potencial de aprovechamiento del biogás generado por las unidades de tratamiento anaerobio.

Según las simulaciones llevadas a cabo por Lobato et al. (2012) el rango de relación unitaria de producción de CH<sub>4</sub> por carga de DQO removida en promedio es de 89 y 199 NL/kgDQO<sub>rem.</sub> Con los datos medidos de los sistemas de tratamiento de Tunja y Samacá en las simulaciones, se registraron valores de DQO removida en el escenario típico que variaron entre 652.6 kg DQO/d y 1405.3 kg DQO/d para Tunja, y entre 479.1 kg DQO/d y 1416.4 kg DQO/d para Samacá. Respecto a la producción volumétrica normalizada de metano en el mismo escenario, se obtuvieron resultados de 133.1 Nm<sup>3</sup>/d a 274.4 Nm<sup>3</sup>/d para Tunja, y de 99.5 m<sup>3</sup>/d a 290.1 m<sup>3</sup>/d para Samacá. Con estos datos, se calculó la relación unitaria de producción de CH<sub>4</sub> de la siguiente manera:

Tunja:

$$\frac{133.1 \text{ Nm}^3/\text{d}}{652.6 \text{ kg DQO}/\text{d}} = 0.203 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg DQO}} \rightarrow 203 \frac{\text{NL}}{\text{Kg DQO}}$$

$$\frac{274.4 \text{ Nm}^3/\text{d}}{1405.3 \text{ kg DQO}/\text{d}} = 0.195 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg DQO}} \rightarrow 195 \frac{\text{NL}}{\text{Kg DQO}}$$

Samacá:

$$\frac{99.5 \text{ Nm}^3/\text{d}}{479.1 \text{ kg DQO}/\text{d}} = 0.207 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg DQO}} \rightarrow 207 \frac{\text{NL}}{\text{Kg DQO}}$$

$$\frac{290.1 \text{ Nm}^3/\text{d}}{1416.4 \text{ kg DQO}/\text{d}} = 0.204 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg DQO}} \rightarrow 204 \frac{\text{NL}}{\text{Kg DQO}}$$

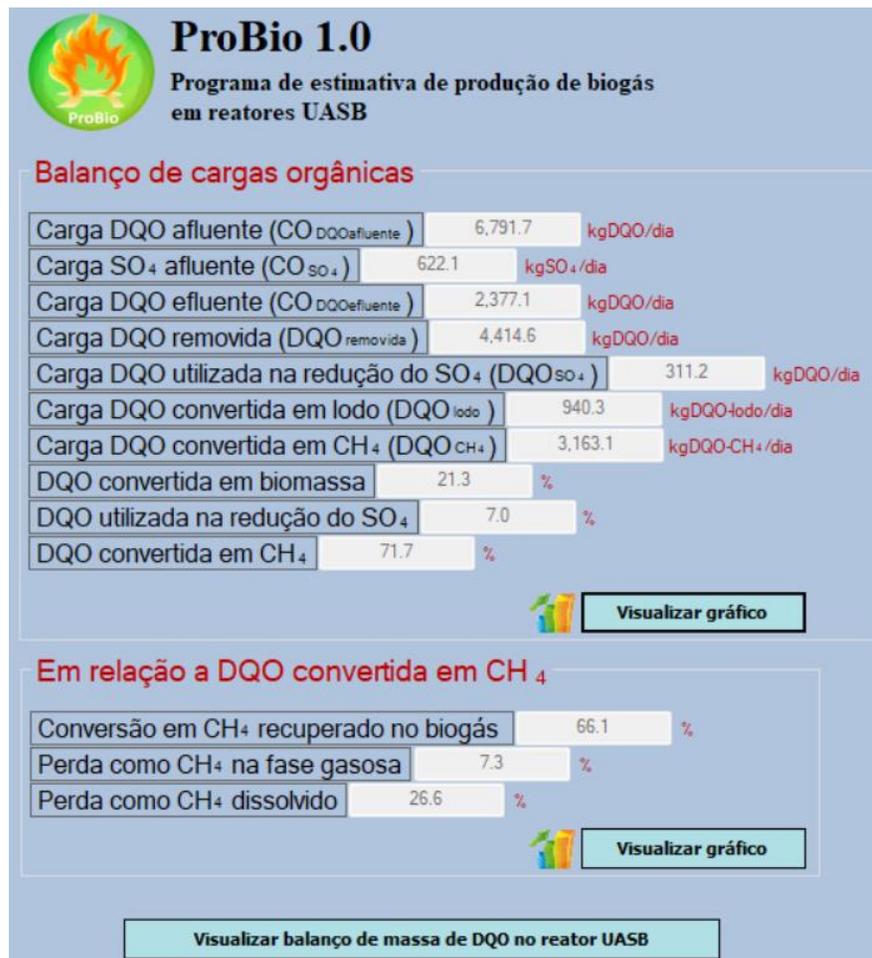
Con estos resultados se puede relacionar que las dos unidades de tratamiento no tienen diferencias significativas de producción de metano, lo que se convierte en biogás más adelante.

Además, en las figuras 8, 9 y 10 se muestra la simulación realizada desde el software Probio 1.0, esta corresponde al promedio de DQO medida en la entrada del reactor UASB del municipio de Tunja, información que puede inferir que la producción normalizada de metano no se aleja de los referentes teóricos mencionados, pues da como resultado 180 NL/Kg DQO y su variación depende de la concentración de la materia orgánica que ingresa al sistema.

$$\frac{798.7 \text{ Nm}^3/d}{4414.6 \text{ kg DQO/d}} = 0.180 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg DQO}} \rightarrow 180 \frac{\text{NL}}{\text{Kg DQO}}$$

**Figura 8**

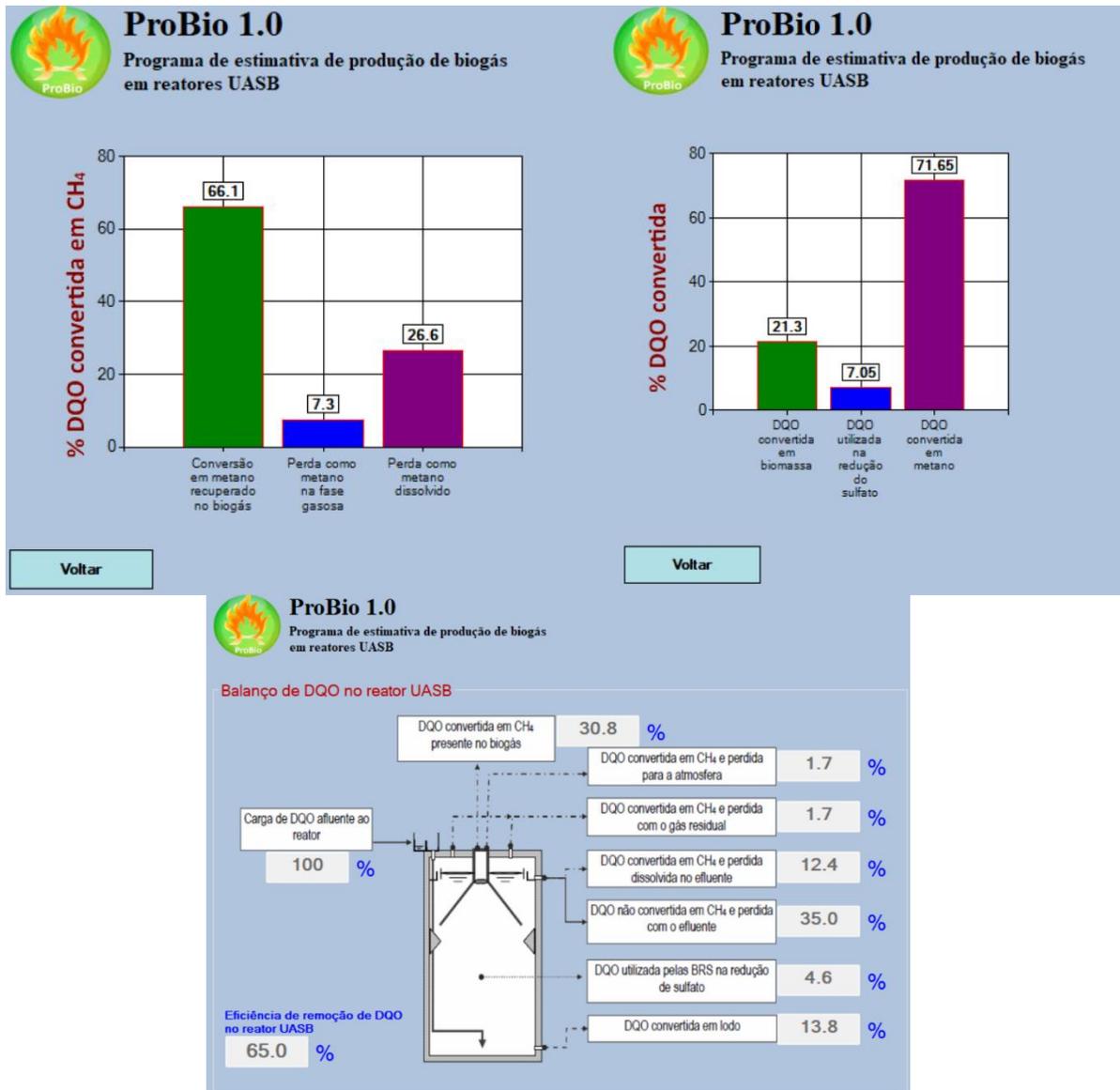
*Resultados obtenidos de la simulación del software*



Fuente: Autor

**Figura 9**

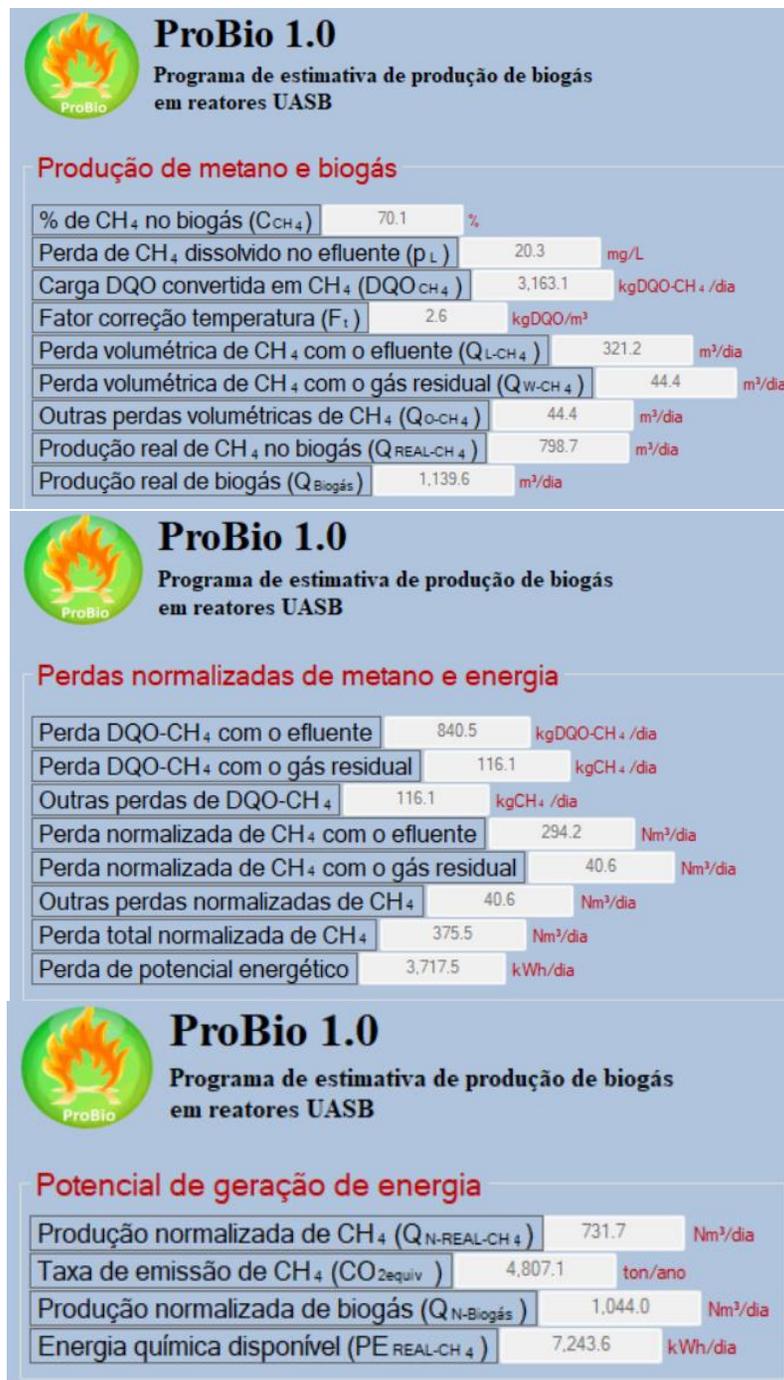
*Gráficos obtenidos de la simulación*



Fuente: Autor.

**Figura 10**

*Resultados de la simulación*



Fuente: Autor.

## **Cuantificación de la producción de lodo en sistemas anaerobios para su tratamiento en la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja**

Este capítulo corresponde a la fase 2 de estimación de subproductos en la estación de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tunja, cuyo objetivo es estimar la producción de lodo en el reactor para evaluar los escenarios en los que se pueda realizar su higienización. En uno de los escenarios, parte del lodo producido se lleva a secado térmico, mientras que en la otra se procesa a través de una centrífuga. Se propone utilizar la cogeneración de energía a partir de biogás para generar energía eléctrica que compense un porcentaje de la energía consumida en el tren de tratamiento, y con la energía de los gases de escape secar térmicamente el lodo. Este modelo se basa en la propuesta de Possetti et al. (2019), que a su vez se fundamenta en el modelo de Lobato et al. (2012). A continuación, se presenta una demostración de la metodología aplicada, la cual se realizó con las mismas condiciones usadas en la estimación de biogás.

### **Producción volumétrica de lodo**

- Producción volumétrica de lodo UASB

$$P_{\text{lodo-UASB}} = Q_{\text{med}} * DQO * Y_{\text{lodo}}$$

Donde:

$Y_{\text{lodo}}$ : Coeficiente de producción del lodo.

Para cada escenario

Peor

$$P_{\text{lodo-UASB}} = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.655 \text{ kg}/\text{m}^3 * 0.25 \text{ kg ST}/\text{kg DQO}_{\text{app}}$$

$$P_{\text{lodo-UASB}} = 1698 \text{ kg ST}/\text{d}$$

Típico

$$P_{\text{lodo-UASB}} = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.655 \text{ kg}/\text{m}^3 * 0.2 \text{ kg ST}/\text{kg DQO}_{\text{app}}$$

$$P_{\text{lodo-UASB}} = 1358 \text{ kg ST}/\text{d}$$

Mejor

$$P_{\text{lodo-UASB}} = 10369 \text{ m}^3/\text{d} * 0.655 \text{ kg}/\text{m}^3 * 0.15 \text{ kg ST}/\text{kg DQO}_{\text{app}}$$

$$P_{\text{lodo-UASB}} = 1019 \text{ kg ST}/\text{d}$$

- Caudal de lodo en el UASB

$$Q_{\text{lodo UASB}} = \frac{P_{\text{lodo-UASB}}}{C_{\text{lodo-UASB}} * \gamma}$$

Donde:

$C_{\text{lodo-UASB}}$  = Concentración de Sólidos Totales en el lodo removido del UASB, (4 %; 40000 mg/L) de ST

$\gamma$ : Densidad del lodo (1020 kg ST/m<sup>3</sup> de lodo)

Cada escenario

Peor

$$Q_{\text{lodo UASB}} = \frac{1698 \text{ kg ST/d}}{0.04 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo UASB}} = 41.62 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{\text{lodo UASB}} = \frac{1358 \text{ kg ST/d}}{0.04 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo UASB}} = 33.28 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{\text{lodo UASB}} = \frac{1019 \text{ kg} \frac{\text{ST}}{\text{d}}}{0.04 * 1020 \frac{\text{kg ST}}{\text{m}^3}}$$

$$Q_{\text{lodo UASB}} = 24.98 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Calcular la producción volumétrica diaria de lodo después de la deshidratación mecanizada

$$P_{\text{lodo-centrífuga}} = P_{\text{lodo-UASB}} * SC_{\text{centrífuga}}$$

Donde:

$SC_{\text{centrífuga}}$ : captura de sólidos en la centrífuga, 90%

Cada escenario

Peor

$$P_{\text{lodo-centrífuga}} = 1698 \text{ kg ST/d} * 0.9$$

$$P_{\text{lodo-centrífuga}} = 1528 \text{ kg ST/d}$$

Típico

$$P_{\text{lodo-centrifuga}} = 1358 \text{ kg ST/d} * 0.9$$

$$P_{\text{lodo-centrifuga}} = 1222 \text{ kg ST/d}$$

Mejor

$$P_{\text{lodo-centrifuga}} = 1019 \text{ kg ST/d} * 0.9$$

$$P_{\text{lodo-centrifuga}} = 917 \text{ kg ST/d}$$

- Caudal del lodo en la centrifuga

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = \frac{P_{\text{lodo-centrifuga}}}{C_{\text{lodo-centrifuga}} * \gamma}$$

Donde:

$C_{\text{lodo-centrifuga}}$ : Concentración de Sólidos Totales después de la centrifuga, 20% de ST

$\gamma$ : densidad del lodo, 1020 kg ST/m<sup>3</sup>

Cada escenario

Peor

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = \frac{1528 \text{ kg ST/d}}{0.2 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = 6.74 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = \frac{1222 \text{ kg ST/d}}{0.2 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = 5.39 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = \frac{917 \text{ kg ST/d}}{0.2 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = 4.05 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Calcular la cantidad de calor generado por el escape de gases del CHP (Calor y energía combinados “cogeneración de energía”)

$$E_{\text{te-esc-gas}} = E_{\text{biogas}} * R_{\text{escape}} * \eta_{\text{te-secado}}$$

Donde

$E_{\text{te-esc-gas}}$ : gases de escape en el secado térmico

$R_{\text{escape}}$  Relación entre el combustible (Biogas) consumido por el motor de combustión interna el contenido calorífico de los gases de escape y la energía total del combustible, 25 %

$\eta_{\text{te-secado}}$  : Eficiencia térmica del secador térmico, 80 %

$E_{\text{Biogas}}$ : es el potencial químico disponible de metano calculado anteriormente denominado  $PE_{\text{REAL-CH}_4}$

Para cada escenario

Peor

$$E_{\text{te-esc-gas}} = 4869 \text{ kWh/d} * 0.25 * 0.8$$

$$E_{\text{te-esc-gas}} = 974 \text{ kWh/d}$$

Típico

$$E_{\text{te-esc-gas}} = 8467 \text{ kWh/d} * 0.25 * 0.8$$

$$E_{\text{te-esc-gas}} = 1693 \text{ kWh/d}$$

Mejor

$$E_{\text{te-esc-gas}} = 13180 \text{ kWh/d} * 0.25 * 0.8$$

$$E_{\text{te-esc-gas}} = 2636 \text{ kWh/d}$$

- Calcular el caudal de lodo después del secado térmico

$$Q_{\text{lodo-secador}} = \frac{P_{\text{lodo-centrífuga}} * SC_{\text{secador}}}{C_{\text{lodo-secador}} * \gamma}$$

Donde

$C_{\text{lodo-secador}}$  : Concentración de Sólidos Totales después de secado térmico, 80% de ST

$SC_{\text{secador}}$ : captura de sólidos en el secador, 90%

Para cada escenario

Peor

$$Q_{\text{lodo-secador}} = \frac{1528 \text{ kg ST/d} * 0.9}{0.8 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-secador}} = 1.7 \text{ m}^3/\text{d}$$

Típico

$$Q_{\text{lodo-secador}} = \frac{1222 \text{ kg ST/d} * 0.9}{0.8 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-secador}} = 1.35 \text{ m}^3/\text{d}$$

Mejor

$$Q_{\text{lodo-secador}} = \frac{917 \text{ kg ST/d} * 0.9}{0.8 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-secador}} = 1.01 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Estimar la masa de agua evaporada ( $M_{\text{agua}}$ )

Para cada escenario

Peor

$$M_{\text{agua}} = Q_{\text{lodo-centrífuga}} - Q_{\text{lodo-secador}}$$

$$M_{\text{agua}} = 6.74 \text{ m}^3/\text{d} - 1.7 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$M_{\text{agua}} = 5.05 \text{ m}^3/\text{d} \text{ ó } 5050 \text{ kg agua/d}$$

Típico

$$M_{\text{agua}} = Q_{\text{lodo-centrífuga}} - Q_{\text{lodo-secador}}$$

$$M_{\text{agua}} = 5.39 \text{ m}^3/\text{d} - 1.35 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$M_{\text{agua}} = 4.04 \text{ m}^3/\text{d} \text{ ó } 4040 \text{ kg agua/d}$$

Mejor

$$M_{\text{agua}} = Q_{\text{lodo-centrífuga}} - Q_{\text{lodo-secador}}$$

$$M_{\text{agua}} = 4.04 \text{ m}^3/\text{d} - 1.01 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$M_{\text{agua}} = 3.04 \text{ m}^3/\text{d} \text{ ó } 3040 \text{ kg agua/d}$$

- Cantidad de energía térmica requerida para satisfacer la demanda

$$E_{\text{te,requerida}} = M_{\text{agua}} * E_{\text{evap}}$$

Donde

$E_{\text{evap}}$  : Energía requerida para evaporar 1 kg de agua, 1.0 kWh (Rosa et al, 2016)

Para cada escenario

Peor

$$E_{\text{te,requerida}} = 5050 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{d} * 1 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kWh}$$

$$E_{\text{te,requerida}} = 5050 \text{ kWh/d}$$

Típico

$$E_{te,requerida} = 4040 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{d} * 1 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kWh}$$

$$E_{te,requerida} = 4040 \text{ kWh/d}$$

Mejor

$$E_{te,requerida} = 3040 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{d} * 1 \text{ kg}_{\text{agua}} / \text{kWh}$$

$$E_{te,requerida} = 3040 \text{ kWh/d}$$

De acuerdo a lo anterior, la cantidad de calor generado por los gases de escape ( $E_{te-esc-gas}$ ) del motor CHP (cogeneración de energía) es en el escenario típico de 1693 kWh/d.

$$\frac{1693}{4040} * 100 = 42\%$$

Este es suficiente para satisfacer solo alrededor del **42%** de la energía térmica necesaria para secar toda la masa de agua del lodo producido en la ETAR (Energía requerida para el escenario típico es de 4040 kWh/d)

**Tabla 9***Resultados producción de lodo de la estación de tratamiento del municipio de Tunja*

M	Escenario	P lodo- UASB Kg ST/d	Q UASB m <sup>3</sup> /d	P lodo- centrífuga Kg ST/d	Q lodo- centrífuga m <sup>3</sup> /d	Q CH <sub>4</sub> normalizado Nm <sup>3</sup> /d	E Biogas kWh/ d	E el kWh/ d	E <sub>te-esc- gas</sub> kWh/d	Q lodo- secador m <sup>3</sup> /d	M <sub>agua</sub> Kg agua/d	E <sub>te,requerid a</sub> Kg/d
1	Peor	394	9.66	354.6	1.56	108.1	1070	375	214	0.391	1170	1170
	Típico	315	7.72	283.5	1.25	192.8	1909	668	382	0.31	940	940
	Mejor	236	5.78	212.4	0.94	303.9	3009	1053	602	0.23	710	710
2	Peor	538	13.19	484.2	2.14	158.4	1568	549	314	0.534	1610	1610
	Típico	431	10.56	387.9	1.71	273.3	2706	947	541	0.43	1280	1280
	Mejor	323	7.92	290.7	1.28	423.4	4192	1467	838	0.32	960	960
3	Peor	540	13.24	486	2.14	159	1574	551	315	0.536	1600	1600
	Típico	432	10.59	388.8	1.72	274.4	2717	951	543	0.43	1290	1290
	Mejor	324	7.94	291.6	1.29	424.9	4207	1472	841	0.32	970	970
4	Peor	481	11.79	432.9	1.91	138.3	1369	479	274	0.477	1430	1430
	Típico	385	9.44	346.5	1.53	240.9	2385	835	477	0.38	1150	1150
	Mejor	288	7.06	259.2	1.14	375.9	3721	1302	744	0.29	850	850
5	Peor	541	13.26	486.9	2.15	159.3	1577	552	315	0.537	1610	1610
	Típico	432	10.59	388.8	1.72	274.4	2717	951	543	0.43	1290	1290
	Mejor	324	7.94	291.6	1.29	425.6	4213	1475	843	0.32	970	970
6	Peor	251	6.15	225.9	1	80.1	793	278	159	0.249	750	750
	Típico	201	4.93	180.9	0.8	133.1	1318	461	264	0.2	600	600
	Mejor	151	3.7	135.9	0.6	202	2000	700	400	0.15	450	450

Fuente: Autor

En la tabla 9 se presentan los resultados de las mediciones realizadas en función de la producción de lodo del reactor UASB; esta información indica cuánto lodo se puede secar térmicamente con la energía de los gases de escape generados por el moto generador de energía (CHP) del biogás, según su producción volumétrica. En promedio, para cada escenario (peor, típico, mejor), se generan 265.2 kWh/d, 458.3 kWh/d y 711.3 kWh/d, respectivamente, correspondientes a los gases de escape del CHP. Según la cantidad de lodo producido, la energía requerida para secarlo térmicamente para cada escenario es de 1361.7 kWh/d, 1091.7 kWh/d y 818.3 kWh/d, respectivamente.

Según estos resultados, se puede afirmar que, en el peor escenario, solo se puede satisfacer el 19.5% de la energía requerida para secar el lodo residual del reactor UASB. En un escenario más favorable, se supliría el 42%, y en el mejor de los casos, el 87%. Aunque no se puede secar totalmente el lodo residual con la energía de escape, es útil aprovechar un porcentaje de esta para tratar los lodos y convertirlos en biosólidos, los cuales se pueden utilizar en uso agrícola según la categoría A o B de acuerdo al decreto 1287 del 2014 como se verá en el capítulo tres.

Por otro lado, el sistema de tratamiento del municipio de Samacá arrojó resultados similares frente a los escenarios planteados anteriormente. Es decir, que en el peor escenario solo se puede satisfacer el 20.6% de la energía requerida para secar el lodo residual del reactor UASB. En un escenario más favorable, se supliría el 43.4%, y en el mejor de los casos, el 88%, los resultados de las simulaciones se muestran a continuación en la tabla 10.

**Tabla 10***Resultados producción de lodo de la estación de tratamiento del municipio de Samacá.*

M	Escenario	P lodo- UASB Kg ST/d	Q UASB m <sup>3</sup> /d	P lodo- centrífuga Kg ST/d	Q lodo- centrífuga m <sup>3</sup> /d	Q CH <sub>4</sub> normalizado Nm <sup>3</sup> /d	E Biogas kWh/ d	E el kWh/ d	E <sub>te-esc- gas</sub> kWh/d	Q lodo- secador m <sup>3</sup> /d	M <sub>agua</sub> Kg agua/d	E <sub>te,requerid a</sub> Kg/d
1	Peor	253	6.2	227.7	1	72.9	722	253	144	0.251	750	750
	Típico	202	4.95	181.8	0.8	127.5	1262	442	252	0.2	600	600
	Mejor	152	3.73	136.8	0.6	198.5	1965	688	393	0.15	450	450
2	Peor	293	7.18	263.7	1.16	87.2	863	302	173	0.291	870	870
	Típico	235	5.76	211.5	0.93	149.8	1483	519	297	0.23	700	700
	Mejor	176	4.31	158.4	0.7	231.3	2290	802	458	0.17	530	530
3	Peor	184	4.51	165.6	0.73	60.4	598	209	120	0.183	550	550
	Típico	147	3.6	132.3	0.58	99.5	985	345	197	0.15	430	430
	Mejor	111	2.72	99.9	0.44	149.5	1480	518	296	0.11	330	330
4	Peor	545	13.36	490.5	2.16	174.4	1727	604	345	0.541	1620	1620
	Típico	436	10.69	392.4	1.73	290.1	2872	1005	574	0.43	1300	1300
	Mejor	327	8.01	294.3	1.3	438.8	4344	1520	869	0.32	980	980
5	Peor	347	8.5	312.3	1.38	105.7	1046	366	209	0.344	1040	1040
	Típico	277	6.79	249.3	1.1	179.4	1776	622	355	0.27	830	830
	Mejor	208	5.1	187.2	0.83	275.2	2724	953	545	0.21	620	620
6	Peor	394	9.66	354.6	1.56	122.1	1209	423	242	0.391	1170	1170
	Típico	315	7.72	283.5	1.25	205.7	2036	713	407	0.31	940	940
	Mejor	236	5.78	212.4	0.94	314.4	3113	1090	623	0.23	710	710

Fuente: Autor

## **Propuesta de aprovechamiento de los subproductos en la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja**

Este capítulo concluye las fases 3 y 4 del proyecto, es relevante destacar que, en la actualidad, en el municipio de Tunja no se realiza ningún proceso de aprovechamiento o tratamiento del biogás; en cuanto a los lodos residuales del reactor UASB, son sometidos a centrifugación y luego dispuestos en el relleno sanitario. Por otra parte, en Samacá, se sabe que existe un quemador de biogás, pero se desconoce si está en funcionamiento en la actualidad. En lo que respecta al tratamiento de lodos, estos son llevados a lechos de secado, estabilizados con cal y finalmente dispuestos en relleno sanitario.

El biogás debe ser tratado antes de su uso en la generación de energía eléctrica. Este tratamiento incluye la eliminación de impurezas y humedad para mejorar su calidad y eficiencia en la combustión según la información del manual del biogás (FAO, 2011), algunos de estos procesos son:

1. **Desulfuración:** eliminación de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es corrosivo y tóxico, por lo que su eliminación es crucial.
  - Filtros de carbón activado: Adsorben el  $H_2S$ .
  - Lavado químico: Usando soluciones alcalinas para eliminar el  $H_2S$ .
  - Biorreactores: Utilizan bacterias especializadas para oxidar el  $H_2S$  a azufre elemental.
2. **Deshidratación:** eliminación de vapor de agua el biogás suele contener vapor de agua, que puede causar corrosión y problemas operativos en los equipos.
  - Enfriadores y separadores: Condensan el agua del biogás.
  - Secadores de adsorción: Usan materiales higroscópicos para adsorber el agua.
3. **Eliminación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ):** el  $CO_2$  no es combustible y reduce el poder calorífico del biogás.
  - Absorción química: Usando soluciones de aminas para absorber el  $CO_2$ .
  - Adsorción por oscilación de presión (PSA): Utiliza materiales porosos que adsorben el  $CO_2$  bajo presión.
    - Membranas de separación: Permiten el paso de metano mientras retienen el  $CO_2$ .
4. **Compresión:** el biogás tratado se comprime para facilitar su almacenamiento y transporte. Esto es especialmente importante si se va a utilizar en motores de combustión interna o en

redes de distribución de gas.

5. Eliminación de otros contaminantes: Además del H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>, el biogás puede contener otros contaminantes como amoníaco, siloxanos y partículas sólidas que también deben ser eliminados mediante diferentes tecnologías de filtración y adsorción.

Los resultados obtenidos de las estimaciones de producción de subproductos del reactor UASB han permitido conocer que es factible aprovechar el biogás para cubrir una parte de la demanda energética de la estación como se observó en el capítulo uno. No obstante, se han evaluado otras opciones con base en dichos resultados para aprovechar de manera óptima estos subproductos y generar un producto de valor añadido, como los biosólidos, teniendo en cuenta el manejo actual dado al biogás y lodos residuales. A continuación, se presentan dos escenarios que proponen alternativas para el aprovechamiento de la energía del biogás en la red eléctrica dentro del mismo sistema, incluyendo recuperar la energía de los gases de escape durante este proceso para el tratamiento de los lodos, incluyendo el secado térmico, la estabilización alcalina y la deshidratación mecánica mediante centrifugación.

## Escenarios 1 y 2

Se plantean dos escenarios para ilustrar el balance general de energía al considerar el uso de un motor de cogeneración de calor y electricidad (CHP). En el primero, se propone dirigir la energía del biogás a la red eléctrica mediante el motor CHP. En este escenario, el calor de los gases de escape del motor se utiliza para secar térmicamente los lodos residuales, con una eficiencia del 80% en la combustión del motor (ver figura 11).

Los datos que se utilizan en esta estimación corresponden a los mostrados en la memoria de cálculos del capítulo uno y dos, por lo que el caudal es 10368 m<sup>3</sup>/d y la DQO de 655 mg/L.

**Escenario 1.** Lodo de la centrífuga es de 1222 kg ST/d (es el mismo del resultado obtenido en el capítulo 2). Aprovechamiento del gas en secado térmico del lodo producido en el reactor UASB, teniendo como referencia a Possetti, et al (2021) con el escenario típico

- Caudal del lodo en la centrífuga

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = \frac{P_{\text{lodo-centrifuga}} * 0.4}{C_{\text{lodo-centrifuga}} * \gamma}$$

Donde:

$C_{\text{lodo-centrifuga}}$ : Concentración de Sólidos Totales después de la centrifuga, 20% de ST

$\gamma$ : densidad del lodo, 1020 kg ST/m<sup>3</sup>

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = \frac{1222 \text{ kg ST/d} * 0.4}{0.2 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

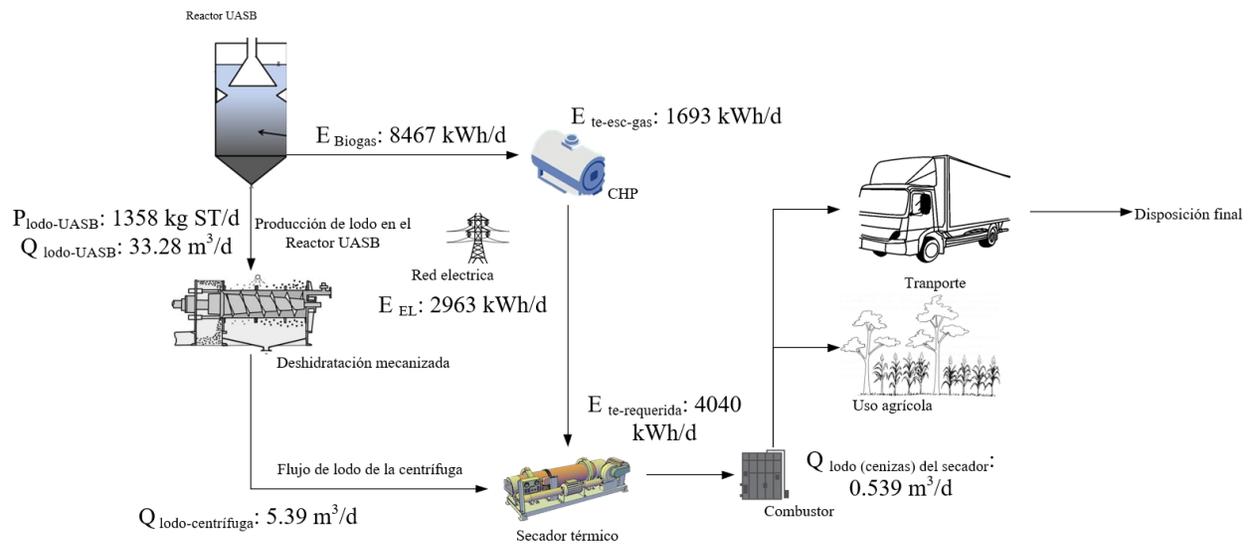
$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = 2.40 \text{ m}^3/\text{d}$$

En la figura 11 se muestra el diagrama de flujo para el aprovechamiento de los subproductos; primero la línea de biogás, el cual después de recibir el tratamiento adecuado para su uso, se dirige hacia un motor de cogeneración (CHP), este proporciona energía eléctrica a los procesos de la ETAR, además genera unos gases de escape que pueden ser utilizados en energía térmica para el secado de los lodos, es importante tener en cuenta que para secar los lodos se debe estimar la energía requerida en función de la producción de lodo en el reactor, por tal razón se habla de “E te-requerida” que representa la energía térmica necesaria para secar completamente el 100% de los lodos después de la deshidratación mecanizada. En este punto, se propone el uso del biogás para suplir parte de la energía eléctrica necesaria, así como para tratar los lodos residuales del biogás, estos lodos, como se muestra en el esquema, pueden ser aprovechados en la agricultura según su categoría.

La figura 12 presenta un sistema similar correspondiente al escenario 2, con un ajuste donde solo el 40% del lodo proveniente de la centrifuga se dirige al secado térmico, mientras que el 60% restante se estabiliza con cal para obtener un biosólido con potencial de aprovechamiento.

**Figura 11**

*Escenario 1. Secado térmico del 100% del lodo generado*



Fuente: Autor

**Escenario 2.** Una segunda opción es suponer que el 40% del lodo de la centrífuga sea dirigido al secado térmico, y el resto del lodo debe desinfectarse con cal (estabilización alcalina prolongada).

Asumiendo que el 40% (488.9 kg ST/d) es dirigido al secado térmico (ver figura 12).

- Calcular el caudal de lodo después del secado térmico

$$Q_{\text{lodo-secador}} = \frac{P_{\text{lodo-centrífuga}} * SC_{\text{secador}}}{C_{\text{lodo-secador}} * \gamma}$$

Donde

$C_{\text{lodo-secador}}$  : Concentración de Sólidos Totales después de secado térmico, 80% de ST

$SC_{\text{secador}}$ : captura de sólidos en el secador, 90%

$$Q_{\text{lodo-secador}} = \frac{488.9 \text{ kg ST/d} * 0.9}{0.8 * 1020 \text{ kg ST/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo-secador}} = 0.5 \text{ m}^3/\text{d}$$

- Estimar la masa de agua evaporada ( $M_{\text{agua}}$ )

$$M_{\text{agua}} = Q_{\text{lodo-centrífuga}} - Q_{\text{lodo-secador}}$$

$$M_{\text{agua}} = 2.4 \text{ m}^3/\text{d} - 0.5 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$M_{\text{agua}} = 1.860 \text{ m}^3/\text{d} \text{ ó } 1860 \text{ kg agua/d}$$

- Cantidad de energía térmica requerida para satisfacer la demanda

$$E_{\text{te,requerida}} = M_{\text{agua}} * E_{\text{evap}}$$

Donde

$E_{\text{evap}}$  : Energía requerida para evaporar 1 kg de agua, 1.0 kWh (Possetti et al,2015)

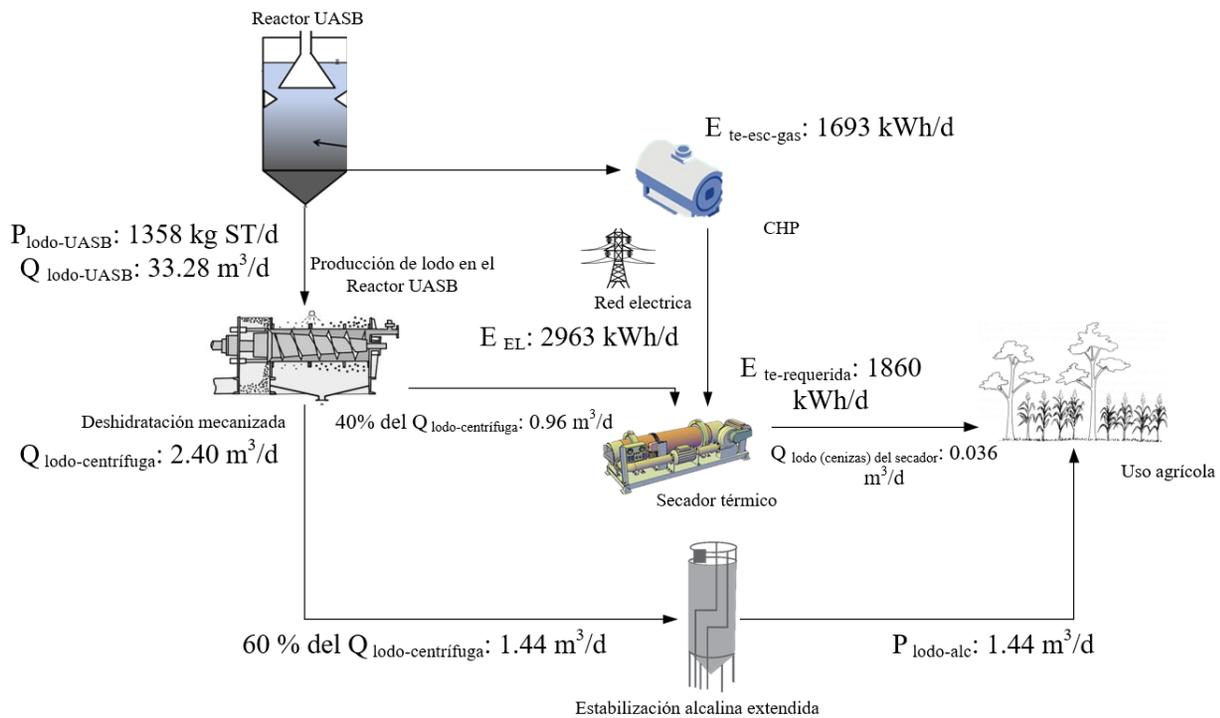
$$E_{\text{te,requerida}} = 1860 \text{ kg agua/d} * 1 \text{ kg agua/kWh}$$

$$E_{\text{te,requerida}} = 1860 \text{ kWh/d}$$

Cogeneración y electricidad en un motor CHP con el lodo tratado térmicamente y estabilización alcalina

**Figura 12**

*Escenario 2. Asumir que el 40% es llevado a secado térmico*



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que el consumo energético de la estación de tratamiento en promedio se encuentra 173692.92 kWh/mes de los módulos y de acuerdo con la estimación teórica de la energía disponible del biogás en el escenario típico es posible suplir el 42% de esta. Y con los resultados del escenario 1 en el cual no se alcanza a secar térmicamente más del 50% de los lodos se propone como alternativa de aprovechamiento de subproductos para la estación de tratamiento de agua residual del municipio de Tunja secar únicamente el 40% del lodo producido en la centrífuga, y el 60% estabilizarlo alcalinamente para obtener un biosólido con potencial uso agrícola, esta propuesta corresponde al escenario 2 planteado anteriormente en el cual se hace uso óptimo de los subproductos generados con base en su tasa de producción en relación con lo que se puede aprovechar, teniendo en cuenta que el manejo actual de estos lodos es que son llevado a la centrífuga, lo cual es una ventaja para poder aplicar beneficiosamente esta propuesta, ya que luego se ser llevados los lodos de la centrífuga al secador térmico da como resultado menos volumen y peso, por lo tanto los costos de transporte y disposición de los lodos se reducen significativamente, haciendo el proceso más económico a largo plazo.

En este punto, estos beneficios también adquieren relevancia, ya que con ese nivel de tratamiento y en conformidad con la normativa nacional, los biosólidos pueden ser utilizados como insumo agrícola en las categorías A y B. De acuerdo con la USEPA (1993), para clasificar un biosólido como de clase A y reducir la cantidad de patógenos en un biosólido de clase B, se consideran métodos como el secado térmico y la estabilización alcalina, los cuales son procesos recomendados para obtener biosólidos de clase B dentro de la misma normativa.

En Colombia, según el Decreto 1287 del 2014, los usos permitidos para los biosólidos de categoría B son:

- En agricultura, se aplica directamente en el suelo.
- En el mejoramiento o recuperación de suelos degradados.
- En agricultura. En plantaciones forestales.
- Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original.
- Remediación de suelos, lechos biológicos
- Como soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
- Como insumo en la fabricación de materiales para la construcción.

- Coadyuvante en la operación de rellenos sanitarios.
- En procesos de valorización energética.
- Revegetalización y paisajismo de escombreras

Este planteamiento fue validado mediante una tesis presentada en el año 2019 por Claudia Rubiano con el propósito de revegetalizar un talud vial utilizando biosólidos como sustrato, en dicha investigación, se llevaron a cabo caracterizaciones físicas, químicas y microbiológicas para determinar las propiedades del biosólido y su viabilidad como recurso. Además, se realizaron ensayos para neutralizar los biosólidos mediante estabilización alcalina. Los resultados indicaron que el uso de biosólidos como fertilizante promueve el crecimiento de la vegetación. Esto demostró que los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Tunja contribuyen al aumento de la velocidad de crecimiento vegetal, la mejora del paisaje y la estabilidad del talud vial (Rubiano, 2019).

Estos usos, además, se convierten en servicios que la empresa de servicios públicos puede ofrecer a la comunidad, lo que conlleva una reducción significativa de los impactos ambientales al disminuir la dependencia de los recursos naturales. Esto implica un importante paso hacia la sostenibilidad, ya que aprovechar los biosólidos como insumo agrícola contribuye a cerrar el ciclo de nutrientes y a promover prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente. Además, al ofrecer estos servicios, la empresa puede fortalecer su compromiso con el desarrollo sostenible y mejorar su imagen ante la comunidad y otras partes interesadas.

Con la finalidad de realizar un ejercicio comparativo entre dos sistemas de tratamiento similares con caudales aportantes diferentes debido a la variación en la población, se plantea la posibilidad de aprovechar estos subproductos en el municipio de Samacá.

### ***Propuesta de aprovechamiento para el sistema de tratamiento de Samacá***

Para evaluar la alternativa viable en el municipio de Samacá, se consideró la relación de la población equivalente para cada municipio, dado que operan en contextos diferentes, como se observa en las siguientes expresiones, hay una gran disparidad en la población entre los dos municipios, y también es importante tener en cuenta que Samacá opera con dos módulos. Aunque el consumo energético real de la estación aún no se conoce, la comparación en la figura 13 sugiere que la cantidad de biogás generado en Samacá no difiere significativamente de la de Tunja debido

a la concentración de la carga orgánica que ingresa al sistema. Esto indica la posibilidad de que se pueda suministrar una cantidad mayor de energía eléctrica para satisfacer la demanda energética de los bombeos y sistemas de aireación en Samacá.

- La población equivalente para el municipio de Tunja para 1 módulo con caudal de diseño de 120 L/s es:

La carga unitaria de DBO es de  $50 \text{ g/hab} * d$  RAS Título E. Tabla 2.6 Aportes per cápita para aguas residuales domésticas

$$\text{Carga de DBO} = [ ] * Q$$

$$\text{Carga de DBO} = 432 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 10368 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 4478976 \frac{\text{g}}{\text{d}}$$

$$\text{Población Equivalente: } \frac{\text{Carga de DBO}}{\text{Carga unitaria}}$$

$$P.E: \frac{4478976 \text{ g/d}}{50 \text{ g/hab} * d} = 89580 \text{ hab}$$

- La población equivalente para el municipio de Samacá es:

La carga unitaria de DBO es de  $50 \text{ g/hab} * d$

$$\text{Carga de DBO} = [ ] * Q$$

$$\text{Carga de DBO} = 518.54 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 1555 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 806298 \frac{\text{g}}{\text{d}}$$

$$\text{Población Equivalente: } \frac{\text{Carga de DBO}}{\text{Carga unitaria}}$$

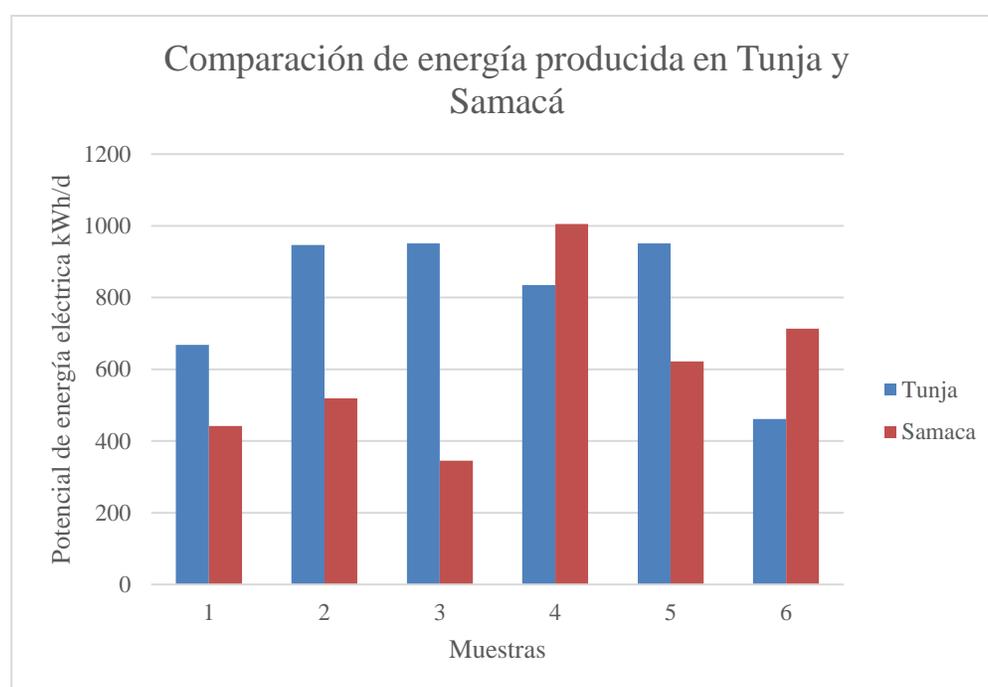
$$P.E: \frac{806298 \text{ g/d}}{50 \text{ g/hab} * d} = 16126 \text{ hab}$$

Teniendo en cuenta que la población del municipio de Samacá es cinco veces menor que la de Tunja como se muestra en las expresiones anteriores, surgen una serie de aspectos a tener en cuenta en ambos casos, al proponer incluir otras estructuras de tratamiento en los sistemas; por lo tanto, a partir de un estudio demográfico que permita dimensionar nuevamente la capacidad de las estructuras para tener en cuenta el volumen de aguas residuales actuales y a futuro; otro aspecto importante es el diagnóstico actual de las estaciones, en aspectos operativos, hidráulicos y de eficiencia, lo cual permite identificar las necesidades, de tratamiento, aspecto importante sobre los costos iniciales del sistema propuesto ya que es necesario considerar la compra de una centrífuga y un secador térmico, a diferencia de Tunja, que posiblemente pueda cubrir estos gastos

a mediano y largo plazo, además que ya cuenta con centrífuga. Esta situación también podría generar conflictos entre la población del municipio de Samacá; esto implica diferencias en las actividades socioeconómicas de cada municipio. En términos económicos, la implementación de nuevas estructuras de tratamiento podría generar descontento inicial en la población debido al aumento en el costo del servicio. No obstante, a largo plazo, se compensarían estos costos con el ahorro en el consumo de energía mediante el uso del biogás.

### Figura 13

#### *Energía disponible de Biogas Tunja vs Samacá*



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que la población del municipio de Samacá es cinco veces menor que la de Tunja, surgen varios aspectos a considerar para proponer la inclusión de nuevas estructuras de tratamiento en los sistemas existentes. En primer lugar, es necesario realizar un estudio demográfico para redimensionar la capacidad de las estructuras y considerar el volumen de aguas residuales tanto actuales como futuras. Otro aspecto importante es el diagnóstico actual de las estaciones en términos operativos, hidráulicos y de eficiencia, lo que permita identificar las necesidades de tratamiento.

Es fundamental tener en cuenta los costos iniciales del sistema propuesto, ya que se requiere la compra de una centrífuga y un secador térmico en este municipio; y a diferencia de Samacá, Tunja posiblemente pueda cubrir estos gastos a mediano y largo plazo, además este sistema ya cuenta con centrífuga. Esta situación podría generar conflictos en la población de Samacá, ya que la diferencia en poblaciones sugiere también diferencias en las actividades socioeconómicas de cada municipio.

En términos económicos, la implementación de nuevas estructuras de tratamiento podría generar un descontento inicial en la población debido al aumento en el costo del servicio. No obstante, a largo plazo, estos costos se compensarían con el ahorro en el consumo de energía mediante el uso del biogás.

## Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de investigación concluyó que la evaluación de alternativas de reutilización de biogás y biosólidos en el municipio de Tunja destaca la importancia de aprovechar de manera eficiente los recursos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Así mismo la metodología empleada proporciona un balance de masa siendo una herramienta fundamental para generar escenarios futuros de aprovechamiento del metano y el lodo del reactor UASB sobre las posibilidades de utilización del biogás y los biosólidos en lugares donde se tengan sistemas de digestión anaerobia. De igual manera, el proceso de evaluación abarco la estimación de la producción de biogás en el reactor UASB junto con su potencial de aprovechamiento. Al calcular teóricamente la cantidad de biogás generado, lo cual pudo determinar su viabilidad para su utilización como fuente de energía alternativa, por lo que la metodología presentada representa una gran oportunidad para la toma de decisiones y puede contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental y económica del sistema de tratamiento de aguas residuales. Además, al considerar el potencial de aprovechamiento del biogás, se abren oportunidades para reducir los costos operativos y mejorar la gestión de los recursos energéticos en el municipio de Tunja.

Los resultados obtenidos con la metodología aplicada permitieron establecer teóricamente el potencial energético del biogás para un módulo de la estación de tratamiento, logrando utilizar esta energía para suplir parte del consumo real de la planta. Este panorama mejora significativamente al considerar el aprovechamiento del biogás de los tres módulos. Además que permite tratar los lodos residuales para obtener productos con valor agregado, la empresa Veolia puede usar los biosólidos para revegetalizar zonas como medida de compensación ambiental.

De igual manera, la cuantificación de la producción de lodo en sistemas anaerobios para su tratamiento en la Estación de Tratamiento de Agua Residual fue fundamental para implementar estrategias adecuadas para su manejo y disposición final, con esta información también se puede dimensionar correctamente las instalaciones de tratamiento de lodos y planificar su mantenimiento de manera óptima. proporcionando una base sólida para la gestión integral de los residuos sólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de Tunja, contribuyendo así a la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental del sistema.

Al valorar los subproductos, como el biogás y los biosólidos, se pueden desarrollar estrategias efectivas para su uso beneficioso. Esta propuesta no solo busca reducir los residuos y

minimizar los impactos ambientales, sino también aprovechar el potencial energético y agrícola de los subproductos. Al promover su reutilización en la generación de energía y su aplicación en la agricultura, se fomenta la economía circular y se contribuye a la resiliencia, la autonomía del sistema de tratamiento de aguas residuales, la optimización de los recursos y la sostenibilidad ambiental.

La metodología aplicada permitió evaluar diversas alternativas las cuales incluyeron la estimación teórica tanto del biogás como de la producción de lodo, con el objetivo de determinar su potencial de aprovechamiento dentro del sistema de tratamiento. Según lo propuesto en el plan de aprovechamiento del biogás, se pretende utilizar este recurso para cubrir un porcentaje específico de la demanda energética. Asimismo, se contempla aprovechar la energía proveniente de los gases de escape para el tratamiento de los lodos residuales, lo que permitiría obtener un producto valioso como el biosólido, con aplicaciones potenciales en la agricultura. También se observó cómo la metodología es aplicable a una variedad de sistemas de tratamiento que utilizan procesos anaerobios, como en el caso de los municipios de Tunja y Samacá. En este sentido, es crucial considerar las dinámicas de operación, condiciones hidráulicas y económicas para evaluar la viabilidad de la alternativa propuesta, dado que cada municipio presenta particularidades.

A partir de lo planteado en el documento se concluye la necesidad de explorar en mayor medida el aprovechamiento energético del biogás generado por los reactores UASB en los próximos años en el país, ya que este tipo de sistemas han sido implementados en varias regiones y el reconocimiento de los beneficios potenciales del biogás para reducir los costos operativos de las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, para lograr este objetivo, es fundamental contar con una planificación adecuada de los proyectos de aprovechamiento de biogás, comenzando por una medición precisa de su disponibilidad, y comparar con metodologías como la presentada en este documento que brindan una visión de los posibles escenarios a abordar para el aprovechamiento de subproductos.

Además, es crucial comprender plenamente los posibles beneficios del aprovechamiento energético del biogás, no solo para los sistemas de tratamiento, sino también para el medio ambiente y la sociedad en general. En este contexto, la metodología aplicada representa una herramienta valiosa para estimar la producción de biogás en los reactores UASB. Sin embargo, es imperativo realizar un estudio preliminar de las condiciones operativas y las posibles emisiones de gases fugitivos en los reactores que se evaluarán.

Esta investigación permitió concluir que cualquier forma de aprovechamiento del biogás generará importantes beneficios en la reducción de la huella de carbono del sistema, por ejemplo, contribuir para disminuir la demanda energética en los tratamientos empleados, como el escenario presentado que es favorable, ya que con tres módulos operativos se podría cubrir el 42% de la energía consumida. De esta manera, se aprovecharía el biogás y se evitaría su liberación, lo que evitaría la contaminación ambiental. Su uso para la generación de energía eléctrica, ya sea para consumo interno en la estación o, inclusive considera su conexión a la red pública, así como su aplicación en procesos térmicos para el secado e higienización del lodo, el calentamiento de agua y otras aplicaciones, puede contribuir significativamente a la diversificación de la matriz energética del país y aportar beneficios financieros, ambientales y sociales.

El aprovechamiento de los biosólidos resultantes de diferentes sistemas de tratamiento, especialmente de la digestión anaeróbica, ofrece una serie de beneficios adicionales, como su uso en fertilizante agrícola, restaurador de suelos, materia prima para la producción de energía y otros usos, estas prácticas no solo les otorgan un valor agregado a los biosólidos, sino que también promueven la implementación de sistemas sostenibles, como la incorporación de la energía proveniente del biogás dentro del mismo sistema de tratamiento.

En resumen, este estudio de caso demuestra el potencial de recuperación de subproductos de las aguas residuales y los beneficios diversos que esto puede generar en la comunidad. Promueve una visión de saneamiento más sostenible y universal, lo que podría facilitar la aceptación de los sistemas de tratamiento y recuperación de subproductos en las comunidades donde se implementen.

## Recomendaciones

Se sugiere realizar mediciones en tiempo real para determinar la cantidad de biogás generado por el reactor UASB en el municipio de Tunja, dado que el estado actual del sistema presenta fisuras en el separador trifásico GLS causando pérdidas de biogás, es crucial llevar a cabo mantenimiento y mejoras en los módulos para maximizar el aprovechamiento del biogás generado. Estas mediciones deben compararse con los escenarios proporcionados por la metodología expuesta, que evalúa la viabilidad y el potencial de los subproductos, como el biogás para recurso energético.

El biogás debe ser tratado antes de su uso en la generación de energía eléctrica. Este tratamiento incluye la eliminación de impurezas y humedad para mejorar su calidad y eficiencia en la combustión. Se desulfura para eliminar compuestos de azufre, como el sulfuro de hidrógeno, y se elimina la humedad mediante procesos de enfriamiento y condensación. Se utilizan filtros para eliminar partículas sólidas y otros contaminantes, y el biogás se comprime para su almacenamiento y transporte. Se recomienda un sistema de recolección de biogás y se pueden emplear otros equipos como desulfuradores, secadores de gas, compresores de biogás y generadores de energía. Es esencial implementar sistemas de control y monitoreo para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del proceso.

También es esencial considerar que, en el caso de los biosólidos tratados mediante estabilización alcalina, el enfoque principal radica en la eliminación o reducción de la materia orgánica presente en los lodos residuales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que otros compuestos, como metales pesados, plaguicidas y material inorgánico, seguirán presentes en el producto final. Por lo tanto, se hace recomendación realizar un análisis para determinar si estos componentes constituyen residuos peligrosos o no. Esta evaluación será fundamental para establecer el tipo de manejo y disposición final más adecuados para los biosólidos tratados.

## Referencias

- Appels, L., Lauwers, J., Degréve, J., Helsen, L., Lievens, B., y Willems, K. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 295-430.
- Carrasco, J. (2015). *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: una estrategia para diferentes contextos*. (Trabajo de grado, Universidad de Chile). Repositorio UCHILE <https://repositorio.uchile.cl/>
- Chernicharo, C, L., Bressani, T. (2019). *Anaerobic reactors for sewage treatment: design, construction and operation*. IWA Publishing
- Lobato, L., Chernicharo, L., Souza, L. (2012) Estimates of Methane Loss and Energy Recovery Potential in Anaerobic Reactors Treating Domestic Wastewater. *Water Science and Technology*. 66 (12), 2745–2753. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.514>.
- Lozada, P., Silva, J., y Bedoya, D. (2013). Efecto del secado alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química Nova*. 36(2), 207-214. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000200002>
- Metcalf, L., y Eddy, H. (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery* (Fifth ed.). McGrawHill.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Decreto. (2014, 10 de julio). Por el cual se establecen criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. [Decreto 1287 de 2014]. DO: 49208.
- Nolasco, D. A. (2010). Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales. *Banco Interamericano de Desarrollo*. 116, 87-100. <http://dx.doi.org/10.18235/0009926>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011). *Manual de biogás*. <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- Possetti., G., Rietow, J. C., Lobato, L., Mansur, M., Chernicharo, C. A. L. (2021) Valoração e Gerenciamento de Subprodutos Gasosos Do Tratamento Do Esgoto. Parte A: Avanços Nas Ferramentas e Técnicas Para Estimativas de Produção e Tratamento de Biogás Em ETES

- Com Reactores Anaeróbios. *Cadernos Técnico Engenharia Sanitária e Ambient*, 01 (10).  
<https://www.abes-dn.org.br/cadernos-tecnicos-revista-esa-ict/>
- Remis, R., Mendoza, E, G. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción más Limpia*, 7(2) 77-81.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S19094552012000200006&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S19094552012000200006&script=sci_abstract&tlng=es)
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2000, 17 de noviembre). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. [Resolución 1096]. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>
- Rubiano, C. (2019). *Aprovechamiento de biosólidos de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja, como alternativa de sustrato en la revegetalización de taludes*. (Tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). Repositorio UPTC.  
[https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3674/Aprovechamiento\\_biosolidos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3674/Aprovechamiento_biosolidos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Silva, C., Bressani, R, T., Silva, B., Dias, A., Pereira, P, N., y Chernicharo, A. (2019). Contribucion para el perfeccionamiento del diseño la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas- Parte 3: Gestion del lodo y la nata. *Revista DAE*, 214(66). 30-55.  
[https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/cr/undp\\_cr\\_DAE\\_19.pdf](https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/cr/undp_cr_DAE_19.pdf)
- United States Environmental Protection Agency (1993). *Land Application of Sewage Sludge a Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503*. EPA-831-B-93-002b. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency.
- Van Haandel, C., y Lubbe, J. (2019). Anaerobic sewage treatment: Optimization of process and physical design of anaerobic and complementary processes. *IWA Publishing*. 230-330.  
<https://www.iwapublishing.com/>