

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental

UDLAP®

Cuantificación de la biomasa susceptible a transformarse en bioenergía por medio de los lodos activados de las PTAR que administra el municipio de Puebla

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta
la estudiante

Arnold Yair Camacho Zamora

168457

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Dra. Ernestina Moreno Rodríguez

San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2024

Hoja de firmas

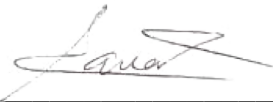
Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta
el estudiante **Arnold Yair Camacho Zamora 168457**

Director de Tesis



Dra. Ernestina Moreno Rodríguez

Presidente de Tesis



Dra. Deborah Xanat Flores Cervantes

Secretario de Tesis



Dra. Adriana Palacios Rosas

RESUMEN

El potencial energético de la biomasa se ha visto deslucido por las energías renovables populares como la Solar y Eólica, sin embargo, su alta versatilidad de uso y su variedad de fuentes de aprovechamiento la ha convertido en una de las principales fuentes de energía renovable en México. Por tanto, en el siguiente trabajo se realizó un análisis del potencial energético del metano que se puede obtener de los lodos activados generados en las nueve PTAR que administra el municipio de Puebla. La cuantificación de metano se desarrolló por medio del modelo "Producción de biogás a partir de la DQO biodegradable removida" para condiciones favorables de un reactor anaerobio. Se observó que el potencial energético del municipio de Puebla puede alcanzar los 273 GWh al año, pudiendo suministrar poco más de 88,000 viviendas en Puebla de energía eléctrica.

Palabras clave: lodos activados, metano, DQO, potencial energético, biomasa, biogás.

ABSTRACT

The energy potential of Biomass has been overshadowed by popular renewable energies such as Solar and Wind, however, its high versatility of use and its variety of sources of utilization has made it one of the main sources of renewable energy in Mexico. Therefore, in the following work, an analysis of the energy potential of methane that can be obtained from the activated sludge generated in the nine WWTPs managed by the municipality of Puebla was carried out. The quantification of methane was developed by means of the model "Biogas production from removed biodegradable COD" for favorable conditions of an anaerobic reactor. It was observed that the energy potential of the municipality of Puebla can reach 273 GWh per year, being able to supply just over 88,000 homes in Puebla with electricity.

Keywords: Activated sludge, methane, COD, energy potential, biomass, biogas.

1. Introducción

El consumo energético a nivel mundial tiene como principal suministro las energías fósiles, como el petróleo crudo y petrolíferos, los cuales representan el 38.94% (SENER, 2022). En contraste, los suministros provenientes de energías renovables y gas natural apenas alcanzan un 14.15% y 16.96% respectivamente, según los datos descritos por la estructura del consumo total de energía mundial y nacional 2021 del Balance Nacional de Energía de la SENER (2022).

En México el consumo de gas natural y condensados como fuente de energía ha aumentado considerablemente, desplazando al petróleo como la segunda alternativa energética con un porcentaje de participación de 35.33%, mientras que el gas natural aumentó al 51.61% (SENER, 2022). Esto es un punto positivo si se contempla que en 2005 el petróleo crudo y petrolíferos representaba el 47.7% del consumo energético, considerando que es una fuente fósil muy contaminante que actualmente representa aproximadamente un tercio de las emisiones de carbono en el planeta (Nuñez, 2015). En comparación, el gas natural se considera un elemento más limpio en cuanto emisiones se refiere, además que puede cumplir la función de generación de energía con la misma eficacia que sus predecesores el petróleo y el carbón. No obstante, no deja de ser una energía fósil contaminante y que en su momento también va a ser escaso.

Respecto a energías renovables, México está por detrás del porcentaje mundial de contribución, representando únicamente el 10% del consumo nacional, siendo el 4.54% de participación para la energía Geotérmica, Eólica y Solar, el 3% para la Hidroeléctrica, 3.39% para la biomasa y 0.023% para el biogás (SENER, 2022).

1.1. Plantas de Tratamiento de aguas residuales y biogás como energía sustentable.

Las aguas residuales son aquellas que han sido usadas en diferentes actividades (domésticas, industriales, agrícolas y/o acuícolas) y cuyas características han sido modificadas por su contaminación con materia orgánica, sustancias tóxicas, pesticidas, metales, desechos, entre otros (Guananga et al, 2024). Debido a su contaminación, las aguas residuales deben ser sujetas a procedimientos que permitan su reutilización o reintegración a su ciclo natural para disminuir las repercusiones al medio ambiente y permitir una mayor disponibilidad de estas (Guananga et al, 2024). En ese sentido, las Plantas de Tratamiento de aguas residuales (PTAR) tienen como propósito la “remoción de partículas contaminantes solubles y no solubles, la separación y tratamiento de la biomasa generada en el proceso biológico” de las aguas residuales (Rubalcava, 2020, p. 4).

No obstante, pese a que PTAR tienen el objetivo de reducir el impacto ambiental negativo del humano en la explotación hídrica de sus cuencas, ríos y aguas subterráneas, también generan un impacto ambiental negativo debido al elevado consumo de energético que requieren, además del uso de recursos naturales no renovables y los residuos generados por las aguas residuales, en específico los lodos activados. Cabe mencionar que a lo largo de la investigación la palabra “lodos activados” tiene 3 intenciones; la primera hace alusión a un tipo de procedimiento de tratamiento de aguas residuales, el segundo es la eliminación de materia orgánica y nutrientes disueltos en el agua de un tratamiento biológico de una PTAR, también conocido como lodo biológico y el tercero (el más utilizado) es el conjunto de todos los lodos generados en las PTAR, principalmente el lodo biológico y lodo primario que es fruto de la remoción del material no disuelto en el agua (Rincón M., et al., 2010).

Entre los diferentes métodos de tratamiento de las aguas residuales, el método de lodos activados es de los más utilizados desde su desarrollo en 1914 (Rubalcava, 2020; Guananga et al, 2024). El método consiste en el ingreso del agua residual al reactor, al cual se suministra Licor Mezclado (cultivo de microorganismos) suministrado por aire en un sistema de difusión por aireación, completando un proceso aerobio (Valdivielso, 2023). El licor separa el agua residual tratada de los microorganismos y productos de la degradación. Parte de la biomasa (lodo activado) separada retorna al reactor para mantener una concentración deseada de microorganismos en el licor mezclado, y la otra parte se retira como desecho (Valdivielso, 2023).

El contenido de estos lodos activados debe ser controlado, almacenado y debe tener una disposición final segura, pues contiene patógenos dañinos a la salud humana y al medioambiente (Cattani, 2018). Usualmente, los lodos activados son enterrados o dispuestos en rellenos sanitarios, pero en años recientes han surgido nuevas tecnologías que aprovechan este residuo para la generación de bioenergía por medio de su fermentación anaerobia (ausencia de oxígeno), el cual, con el debido procedimiento puede formar biogás, al igual que el aprovechamiento de los nutrientes restantes del lodo para la producción de fertilizante natural (Cattani, 2018).

El biogás es una fuente de energía sostenible y renovable que puede utilizarse para producir electricidad, calor o combustible, siendo el enfoque más importante la producción de energía renovable como herramienta contra el calentamiento global (Czekała, 2022). La fuente principal del biogás es la biomasa, la cual consiste en un conjunto de materia orgánica formada por vía biológica (Fernández, s.f.). Su contenido energético se origina de la energía solar que receptiona la flora en el proceso fotosintético, siendo el contenido de carbono en su composición la materia principal de su capacidad calorífica (Fernández, s.f.).

De las energías renovables, la biomasa es la que tiene un uso muy versátil, dado que se puede convertir en cualquier combustible deseado, mejor denominado biocombustible. Ya sea, un biocombustible sólido con su quema directa, uno líquido por medio de la fermentación alcohólica con levaduras o uno gaseoso por medio de la fermentación anaerobia como lo es el biogás (Fernández, s.f.). Aunado a ello puede ser alimentado con productos naturales generados por la tierra de nombre biomasa natural o por residuos de nombre biomasa Residual, dado el caso de los lodos activados.

El proceso de producción de biogás a partir de lodos activados implica la construcción de un reactor anaeróbico que permita la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. En el reactor se mezclan los lodos activados con agua y se mantienen en un ambiente controlado de temperatura y pH para asegurar la actividad bacteriana (Varnero, P. M., 2011). Durante la fermentación anaeróbica, las bacterias convierten la materia orgánica en biogás, que está compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, siendo el metano el que contiene la capacidad calórica principal (Varnero, P. M., 2011).

1.2 PTAR en México-Puebla

México es un país con severos problemas en materia de disponibilidad de agua (López, 2014). A nivel nacional, Puebla está catalogada como una ciudad con una baja disponibilidad de agua, lo cual es consecuencia del “crecimiento poblacional, el auge industrial, el desarrollo agrícola y la extracción desmedida del agua”, así como por la alta vulnerabilidad de los mantos acuíferos hacia la contaminación por infiltración y la deforestación de fuentes de recarga hídrica (López, 2014, p.30). Por ello, de acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación de diciembre 2022, México

cuenta con 2,774 PTAR en funcionamiento. En particular, en el Estado de Puebla se encuentran 152 PTAR, de las cuales 9 pertenecen al municipio de Puebla (Comisión Nacional del Agua, 2022).

No obstante, pese a la situación del país, en comparación con países de otros continentes e incluso en comparación con otros países de Latinoamérica como Chile y Brasil, en México hay pocas investigaciones relacionadas al tratamiento de aguas residuales, sobre todo lo que respecta al proceso de lodos activados, así como lo relacionado a la producción, cuantificación o eficiencia de biogás (Pulgarín et al., 2022; Núñez-García et al., 2023). Asimismo, entre las publicaciones existentes se suelen excluir datos del estado de Puebla y/o solo consideran una PTAR de forma particular, además de que cuyos propósitos específicos no se encuentran la cuantificación de producción de biogás (Contreras, 2022).

Por tanto, el objetivo del presente es cuantificar el potencial energético de los lodos activados de las PTAR que administra el municipio de Puebla, realizando una estimación de la generación de metano y de potencial energético.

2. Metodología

Para la cuantificación de metano en la producción de biogás por medio de lodos activados de las PTAR, se utilizó el modelo conocido en la literatura como Producción de biogás a partir de la DQO biodegradable removida, el cual está diseñado para cuantificar el metano para un reactor anaerobio de acuerdo con la siguiente ecuación (Mantilla G. et al., 2017):

$$V_{CH_4} = (0.35) \left[(S_0 - S)(Q) \left(\frac{1000g}{1Kg} \right)^{-1} - 1.42 P_x \right] \quad (1)$$

Donde:

$V_{CH_4} \left(\frac{m^3}{d} \right)$ = Volumen de metano por día o flujo volumétrico de metano.

0.35 (m^3) = Factor de conversión teórico para la cantidad de metano producido (Meda A. et al., 2012)

$\left(\frac{1000g}{1Kg} \right)^{-1}$ = Conversión de gramos a kilogramos.

$Q \left(\frac{m^3}{d} \right)$ = Caudal o flujo volumétrico de operación de la PTAR. Para los fines del presente, el caudal de cada PTAR fue obtenido a partir del análisis de la base datos del Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación de la CONAGUA, publicado en diciembre 2022.

$S \left(\frac{mg}{L} \right)$ = DQO biodegradable del efluente. Este valor se consideró 150 mg/L, basándose en el límite permisible de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación de DQO descritos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

$S_0 \left(\frac{mg}{L} \right)$ = DQO biodegradable del influente. Para los fines del presente consideró un valor promedio de 1200 mg/L en todas las PTAR, con base a un conjunto de DQO promedio de diferentes investigaciones consultadas, las cuales se describen en la Tabla 1-3.

Tabla 1. Valores típicos de las aguas residuales Urbanas ARU (Metcalf & Eddy, 2003)

Parámetro	ARU Débil	ARU Media	ARU Fuerte
DQO (mg/L)	250	500	1000

Tabla 2. Valores promedio de DQO de influente de distintas PTAR o proyectos.

DQO (mg/L)	PTAR	Referencia
1421.584	CISA	Sánchez L. (2022). Apéndice 1.
495.13	Celendín	Quispe (2019)
1100	Moyobamaba	Rodríguez (2019)
698	Tlaquilpa	MIA PTAR Tlaquilpa, Veracruz.
2268	Agua Residual Industrial	Nadia A. (2018).

Dado que el valor de DQO para el influente puede variar según el lugar, la temporada o algún otro factor ambiental. Para tener un estimado más cercano a la realidad se tomaron en cuenta los valores típicos del libro Metcalf & Eddy (2003) de la Tabla 1 y valores experimentales de distintas PTAR descritos en la Tabla 2. Asimismo, considerando que el municipio de Puebla está en una de las ciudades más pobladas e importantes del país, puede ser considerado dentro de la categoría ARU Fuerte de los valores típicos de Metcalf & Eddy que es 1000 mg/L. Sin embargo, debido a que Puebla tiene varias zonas industriales, uno de los ríos más contaminados del país (Río Atoyac) y que las estimaciones de Metcalf & Eddy son del 2003; pues las concentraciones de contaminación han aumentado. Por lo anterior mencionado y sin alejarse demasiado del valor teórico de Metcalf & Eddy, se considera un valor de 1200 mg/L coincidiendo con el promedio de la tabla 2, que considera tantas aguas residuales domésticas, industriales y un valor real de un PTAR de la misma ciudad de Puebla (CISA).

$P_x \left(\frac{Kg}{d} \right)$ = La masa neta del tejido celular se estimó de acuerdo a la siguiente ecuación (IMTA, 2016):

$$P_x \left(\frac{Kg}{d} \right) = \frac{YQ(S_0 - S) \left(\frac{1000 g}{1 kg} \right)^{-1}}{1 + k_d (SRT)} \quad (2)$$

Donde:

$Y \left(\frac{g SSV}{g DQO_b} \right)$ = Coeficiente de rendimiento o producción. Este valor se considera de 0.1.

Para determinar el coeficiente de rendimiento se requiere conocer la relación que hay con los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) que es todo el material particulado suspendido en el agua y el DQO eliminado, que vendría siendo el material orgánico e inorgánico susceptible a su oxidación. Esto se puede definir conociendo el tipo de agua residual que entra a las PTAR y el proceso de producción de biogás. Para el caso de Puebla es principalmente agua residual domestica o agua servida, pues el agua residual industrial principalmente tiene su propio tratamiento particular o es descargado directamente a las aguas nacionales pagando su respectiva cuota, aunque existen sus excepciones. El modelo de producción de biogás que se sigue tiene una digestión anaerobia mesofílica mezclando el lodo primario y el lodo biológico si es que hay. Considerando la anterior información, de acuerdo a Metcalf & Eddy (2003) los valores típicos de coeficiente de rendimiento están entre 0.05 y 0.1.

$K_d \left(\frac{1}{d} \right) = 0.04$ Coeficiente de decaimiento endógeno. Valores típicos de 0.02 a 0.04 (Metcalf & Eddy, 2003).

$SRT(d)$ = Tiempo de retención de sólidos del digester. El tiempo de retención se considera de 14 días en base a la tabla 3 que especifica el tiempo de retención dependiendo la temperatura de operación. Comúnmente, en reactores anaerobios se utiliza un régimen mesofílico que oscila entre los 25 °C y 35 °C (Varnero, P. M., 2011). Se optó por 30°C al representar la mejor relación

en tiempo de retención sobre temperatura de operación, pues a mayor tiempo de retención, más tiempo y dinero, pero entre más temperatura, aumenta el gasto económico y una mayor inestabilidad en el sistema.

Tabla 3. Tiempo de Retención de Sólidos recomendado para reactores anaerobios de mezcla completa (Metcalf & Eddy, 2003).

Temperatura de operación °C	SRT (mínimo) - Día	SRT (típicos) - Día
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Con la Ecuación 1 y 2 se estimó el volumen de metano generado por día en cada PTAR del Estado de Puebla. Adicionalmente, para estimar el nivel energético del biogás se obtuvieron los moles de metano de cada flujo con la Ecuación 4, y con ello se calculó su caudal másico con la Ecuación 5. Sin embargo, para poder utilizar la Ecuación 5 primero se calculó el volumen de cada mol de metano en forma gaseosa, de acuerdo con la presión y temperatura de operación, utilizando la ley de los gases ideales:

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P} \quad (3)$$

Donde:

V = Volumen de cada mol de metano

$n = 1$ mol de metano

$R = 0.082 \frac{\text{atm L}}{\text{K mol}}$ Constante de los Gases Ideales

$T = 30^\circ\text{C}$ (303.15 K) Temperatura de operación

$P = 1 \text{ atm}$ Presión de operación

$$\text{moles de metano} \left(\frac{\text{molCH}_4}{d} \right) = \frac{V_{\text{CH}_4} \left(\frac{\text{m}^3}{d} \right)}{\frac{V}{n} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mol CH}_4} \right)} \quad (4)$$

$$\text{Caudal másico CH}_4 \left(\frac{g}{d} \right) = \text{moles de metano} \left(\frac{\text{molCH}_4}{d} \right) * \text{Peso Molecular CH}_4 \left(\frac{g}{\text{mol}} \right) \quad (5)$$

Para calcular la cantidad de energía se consideró el factor de conversión 50.1 kJ por cada gramo de metano obtenido en el caudal másico (IMTA, 2016). Asimismo, se convirtió el valor a una unidad energética como los Kilovatio-hora, donde 1 kJ es igual a 0.000278 kWh.

3. Resultados

Se consideraron las PTAR de la ciudad de Puebla, en específico las 9 plantas que administra el municipio de Puebla; en la Tabla 4 se muestra la información de cada PTAR en base al último Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación que realizó CONAGUA en diciembre del 2022.

Tabla 4. Plantas Municipales de Tratamiento de aguas Residuales en Operación en el municipio de Puebla (Conagua, 2022).

Localidad	PTAR	Proceso	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Tratado (L/s)	Cuerpo receptor o uso

Heroica Puebla de Zaragoza	Parque Ecológico	Biodiscos	80	80	Río Alseseca /Riego áreas verdes
Heroica Puebla de Zaragoza	Atoyac Sur	Primario Avanzado	600	600	Río Atoyac
Heroica Puebla de Zaragoza	Puebla Alseseca	Primario Avanzado	700	758	Río Alseseca
Heroica Puebla de Zaragoza	Puebla Barranca del Conde	Primario Avanzado	340	209	Río Atoyac
Heroica Puebla de Zaragoza	Puebla San Francisco	Primario Avanzado	1100	1292	Río Atoyac
Heroica Puebla de Zaragoza	Mira Atoyac	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente RAFA	5	5	Río Atoyac
Heroica Puebla de Zaragoza	CISA	Primario Avanzado	5	3.5	Sin Información
Heroica Puebla de Zaragoza	ACUAPUE	Primario Avanzado	100	50	Río Alseseca
Heroica Puebla de Zaragoza	Rastro municipal	Primario Avanzado	2	2	Sin Información

Tabla 5. Resultados de la generación de metano y energía por medio de los lodos activados de las 9 PTAR que administra el municipio de Puebla (Autor, 2024).

PTAR	V CH ₄ (m ³ /d)	Caudal másico CH ₄ (g/d)	Energía Producida (kWh/d)	Energía Producida (kWh/año)	Porcentaje de aportación (%)
Parque Ecológico	2,308.94	1,486,145.268	20,683.84	7,322,080.38	2.68
Atoyac Sur	17,317.05	11,146,089.51	155,128.82	54,915,602.88	20.11
Puebla Alseseca	21,877.21	14,081,226.42	195,979.41	69,376,711.64	25.41
Puebla Barranca del Conde	6,032.11	3,882,554.513	54,036.54	19,128,935.00	7
Puebla San Francisco	36,712.15	23,629,709.77	328,873.10	116,421,078.1	42.64
Mira Atoyac	144.31	92,884.08	1,292.74	457,630.02	0.17
CISA	122.33	78,739.94	1,095.89	387,943.34	0.14
ACUAPUE	1,443.09	928,840.79	12,927.40	4,576,300.24	1.68
Rastro municipal	144.31	92,884.08	1,292.74	457,630.02	0.17

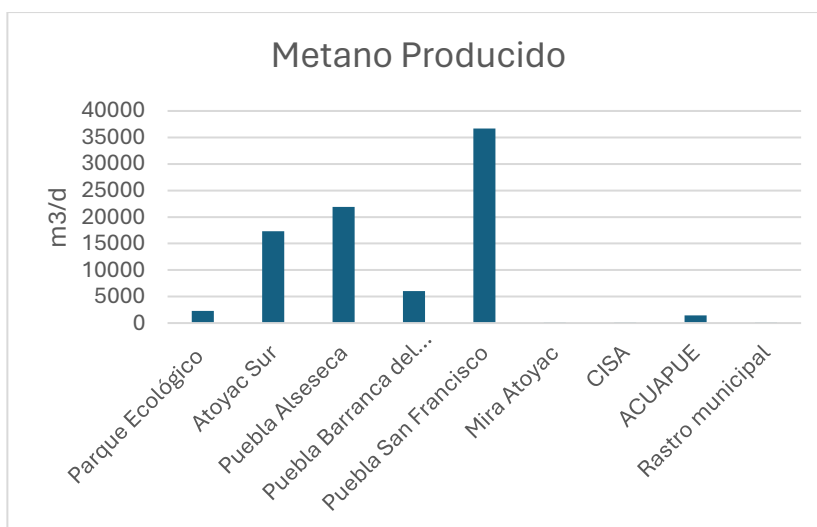


Figura 1. Metano producido de las 9 PTAR que administra el municipio de Puebla (Autor, 2024).

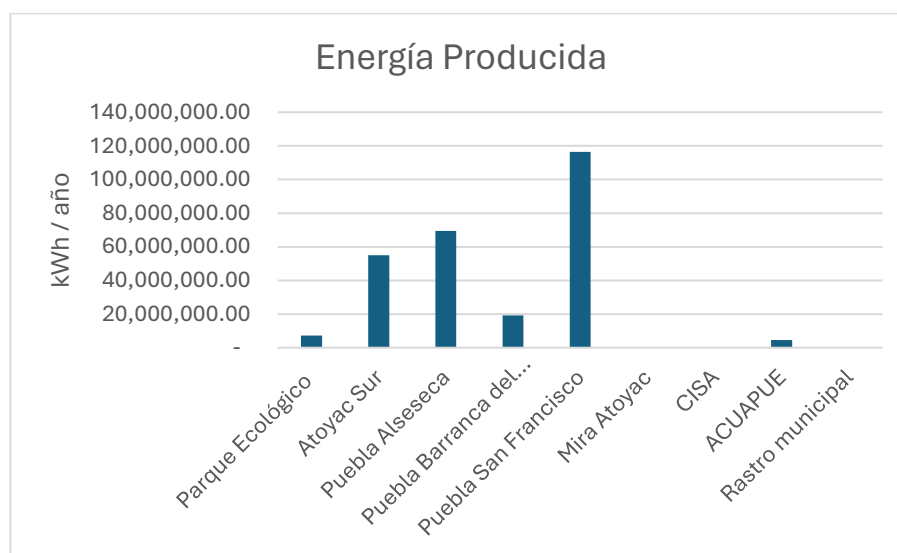


Figura 2. Energía Producida de las 9 PTAR que administra el municipio de Puebla (Autor, 2024).

La cantidad de metano que se puede producir con los lodos activados de las PTAR que administra el municipio de Puebla es de 31,427,046.96 m³/año, lo que equivale a 2,514,163.757 tanques de gas comerciales, si se considera que un tanque de gas de 10 kg puede almacenar

hasta 12.5 m³ de metano (Asociación Argentina de Hidrógeno, 2016). A su vez, el potencial energético que tiene el municipio de Puebla es de 273,043,911.64 kWh/año, lo que equivale al abastecimiento de 88,528 viviendas, si se considera que una vivienda consume aproximadamente 8.45 kWh/d (Calderón C., 2015).

Tabla 6. Potencial de generación de metano y electricidad por planta, representado en tanques de gas y abastecimiento de electricidad en viviendas.

PTAR	Tanques de gas de 10 kg al día	Electricidad a viviendas
Parque Ecológico	185	2,374
Atoyac Sur	1,385	17,805
Puebla Alseseca	1,750	22,494
Puebla Barranca del Conde	483	6,202
Puebla San Francisco	2,937	37,747
Mira Atoyac	12	148
CISA	10	126
ACUAPUE	115	1,484
Rastro municipal	12	148

Por la naturaleza de la investigación, la producción de metano es proporcional al del flujo de operación, siendo la planta de Puebla San Francisco la de mayor capacidad para generar bioenergía a base de lodo activado con casi el 42% de todo el municipio de Puebla, pudiendo abastecer casi 3000 tanques de gas de 10 kg al día o suministrar energía a poco más de 37,500

viviendas. Seguido está la PTAR Puebla Alseseca y Atoyac Sur con el 25% y 20% de aportación respectivamente. Curiosamente las tres PTAR más importantes del municipio de Puebla se encuentran en el sur de la ciudad donde está más concentrada la población (Apéndice 2).

4. Discusión

La cantidad de metano y electricidad calculados en esta investigación sirve para dimensionar el potencial energético que puede tener el municipio de Puebla si todas sus PTAR contaran con una planta de generación de biogás y un sistema de cogeneración de energía. Por ello, hay que contemplar que este potencial energético es casi el máximo que podría alcanzar la ciudad de Puebla, pues como se puede analizar en los reportes de operación mensual de la PTAR CISA, tiene un promedio de DQO de descarga de efluente de 805 mg/L, dejando ver que puede haber PTAR que no cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-2021. Aunque es difícil determinarlo, ya que, los datos de operación de las demás PTAR son privados.

El punto anterior se refuerza con la comparación del Estudio “Energía Limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos activados” de Mantilla G. et al. (2017). Donde con el apoyo de la Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento de México y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, con un conjunto de metodologías de estimación de generación de biogás y generación de energía dependiendo el tipo de proceso de cada PTAR, incluyendo la que se llevó a cabo en esta investigación. Determinaron la cantidad de biogás y energía de 104 PTAR cuyo caudal de diseño sea superior al de 200 L/s. En los apéndices 3-6, así como, en las figuras 3-6 se muestra una comparación con los resultados del estudio de Mantilla G. et al. y los obtenidos en esta investigación, a excepción de las PTAR del municipio de Puebla Mira

Atoyac, CISA y Rastro municipal, por tener un caudal muy pequeño que no pueda ser comparado con otra planta.

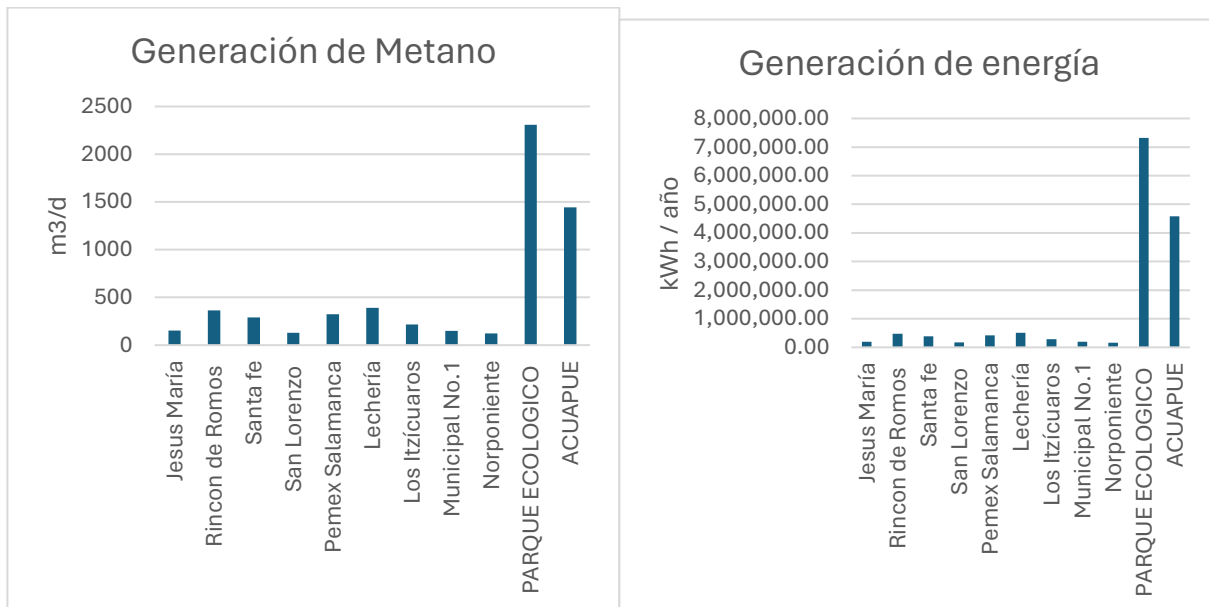


Figura 3. Comparación gráfica de resultados de producción de metano y de electricidad entre las PTAR de 50 a 100 L/s del Estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

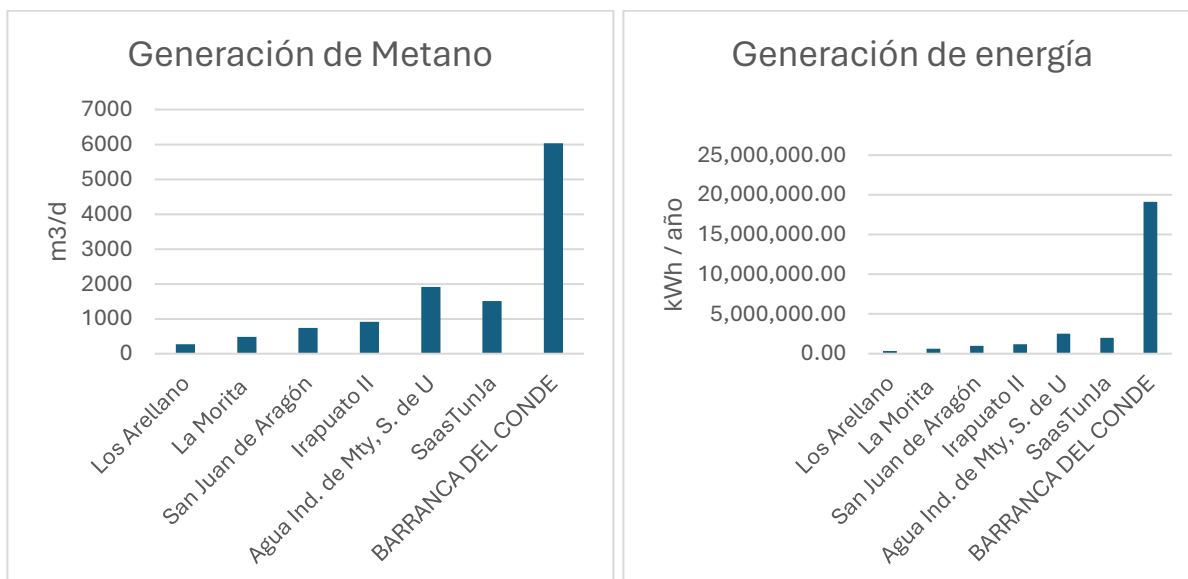


Figura 4. Comparación gráfica de resultados de producción de metano y de electricidad entre las PTAR de 150 a 250 L/s del Estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

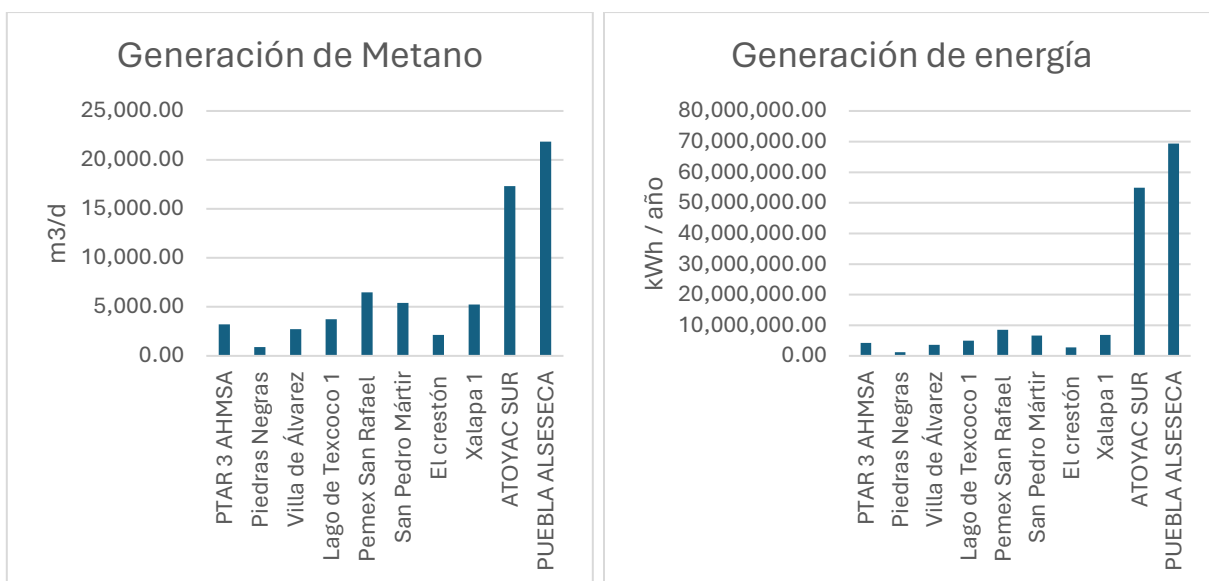


Figura 6. Comparación gráfica de resultados de producción de metano y de electricidad entre las PTAR de 550 a 850 L/s del Estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

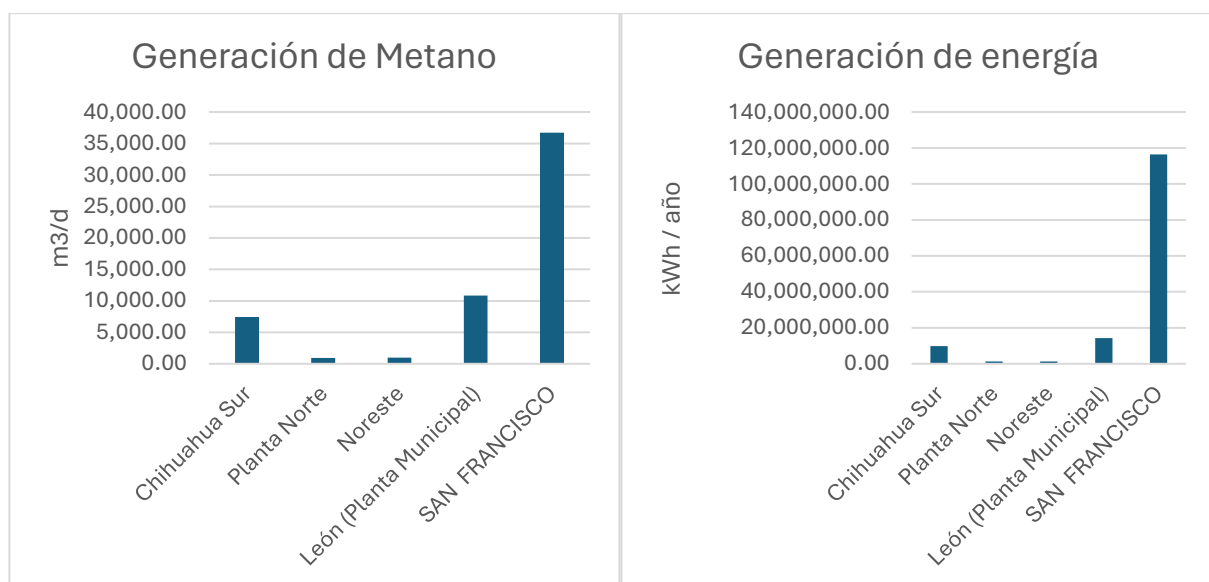


Figura 7. Comparación gráfica de resultados de producción de metano y de electricidad entre las PTAR de 1100 a 1500 L/s del Estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

Como se puede hacer notar en las gráficas, la diferencia de producción en metano y electricidad con el estudio de Mantilla y el de esta investigación es significativa, dejando ver que el estudio de Mantilla al tener la información de operación de todas las PTAR que analizó, sus valores son

más exactos si cada PTAR decidiera instalar su planta de biogás. Mientras tanto, esta investigación valoriza el potencial que podría alcanzar Puebla, no sólo si se instalara una planta de generación de biogás en cada PTAR, sino también que se cumplieran con las normativas federales y las condiciones que se establecieron en el modelo.

Si bien no se puede determinar con exactitud cuál es el factor determinante para explicar la diferencia de producción en ambas investigaciones, pues el estudio de Mantilla no muestra ningún dato de operación que no sea su flujo. Se puede atribuir a las diferencias de DQO que existen en el influente y efluente, pues la generación de metano está relacionada a la cantidad de DQO que se remueve en la planta y como se pudo analizar en la metodología de esta investigación, las PTAR del país no están lo suficientemente reguladas para tener un DQO de entrada y salida estándar, variando mucho este valor entre cada planta.

Es importante resaltar que el modelo que se realizó en la investigación, es bajo el método de lodos activados en donde se incluye en la operación el lodo primario y el lodo biológico. El municipio de Puebla actualmente tiene 7 plantas de tratamiento con un proceso primario avanzado, omitiendo el proceso biológico, significando que no contiene lodo biológico. Sin embargo, como fue mencionado previamente, el lodo biológico contiene la eliminación de la materia orgánica disuelta, la cual es menor a la materia orgánica no disuelta en el lodo primario, considerando que la materia orgánica es la principal fuente de metano. Aunque, debido al alto flujo que contienen las PTAR de Puebla que tienen un proceso primario avanzado, la producción de biogás si se puede ver disminuida.

5. Conclusiones

El aprovechamiento de los lodos activados generados en las PTAR que administra el municipio de Puebla puede tener una segunda utilidad muy benéfica para sus habitantes, pues el potencial energético que se puede generar es de 273 GWh al año. La cuantificación de energía que se realizó puede tener un alto alcance de aprovechamiento, abriendo la posibilidad de ser una opción más sostenible que otro tipo de energías renovables.

Hay que considerar que, en los cálculos los datos de DQO son variables, pues además de que depende del consumo doméstico que tenga la población y/o industria al que se trata el agua, hay que tomar en cuenta factores ambientales o climatológicos. También cabe mencionar que hay contaminantes en particular que pueden inhibir el proceso. Sin embargo, el factor más determinante para considerarlo como una opción sostenible es incluyendo el factor económico; factor que no se incluyó en el análisis.

Esta investigación no solo nos ayuda para determinar el potencial que tiene la ciudad de Puebla para generar bioenergía, sino también para dimensionar la relevancia que tiene y puede tener la biomasa, la cuál ha sido una energía renovable con poco reconocimiento e investigación, pero a los números empieza a ser una de las más relevantes en el mercado.

6. Bibliografía

Asociación Argentina de Hidrógeno (2016). Hidrogeno. Wayback machine. Disponible en:

<https://web.archive.org/web/20160521062809/http://www.aah2.org.ar/propiedades.htm>

Calderón C. G. (2015). Plantas de tratamiento de aguas residuales como fuentes potenciales de energías renovables para el INERE. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197651/22. Las PTAR como potenciales fuentes de energ a.pdf>

Cattani, D. S. (2018). Estabilización de Lodos Activados provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas mediante digestión anaerobia [Tesis de grado]. Universidad de las Américas. Disponible en: <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/9033/1/UDLA-EC-TIAM-2018-11.pdf>

Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2022). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Gobierno de México. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-8-23.pdf>

Contreras, M. (2022). Análisis del funcionamiento de la PTAR de Izúcar de Matamoros y propuesta preliminar del proceso Fenton como tratamiento terciario para disminuir la contaminación ambiental de sulfametoxazol [Tesis de posgrado]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Czekała, W. (2022). El biogás como fuente de energía sostenible y renovable. En: Di Blasio, G., Agarwal, AK, Belgiorno, G., Shukla, PC (eds) Combustibles limpios para la movilidad. Energía, Medio Ambiente y Sostenibilidad. Springer, Singapur. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8747-1_10

Fernández, J. (s.f.). Biomasa [Revista]. Iberdrola. Disponible en: https://www.energias-renovables.com/ficheroenergias/productos/pdf/cuaderno_BIOMASA.pdf

Guananga, N.I., Guevara, L.E., González, M.V. y Freytez, E. (2024). Procesos Biológicos Aplicados a las Aguas Residuales. Editorial Grupo Compás.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA (2016). Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. Disponible en:

<http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1775/TC-1606.3.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, R.J. (2014). Los servicios de agua potable y saneamiento en la ciudad de Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Mantilla G., Sandoval L., Ramírez E., Gasca S., Navarro J., Hernández N., García J., Esquivel A. y Calderón C. (2017). Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales. Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Meda, A., Lensh, D., Schaum, Ch., & Cornel, P. (2012). Energy and water: Relations and recovery potential. In: Water. Energy interactions in water reuse (pp. 21-35). Lazarova, V., Choo, K.-H., & Cornel, P. (eds.). London: International Water Association, IWA Publishing.

Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse (4a ed.). US: MacGrawHill.

- Nadia A. (2018). Tratamiento de Efluentes líquidos industriales (pp. 17). Universidad Nacional de San Martín. Escuela de Ciencia y Tecnología. Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental.
- Núñez C. (2015). Explicación de qué son los combustibles fósiles. National Geographic. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles#:~:text=Cuando%20los%20combustibles%20f%C3%B3siles%20se,global%20y%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico.>
- Núñez-García, U., Navarro-Gómez, H. I., González-Sandoval, M. del R., & Flores-Badillo, J. (2023). Tratamiento biológico de aguas residuales con perspectiva de economía circular. *Paedi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 11(Especial3), 112-122. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11486>
- Proyecto de PTAR en Tlaquilpa, Veracruz (2008). Manifiesto de Impacto Ambiental. Disponible en: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/ver/estudios/2008/30VE2008HD017.pdf>
- Pulgarín, C. E., Saldarriaga, J. C., Correa, M. A. (2022). Análisis y perspectivas del tratamiento anaerobio y el aprovechamiento de lodos biológicos en América Latina. *Revista EIA*, 19(38), 1-25. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1516>
- Quispe, F. (2019). Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales, en la reducción de la demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno en Celendín – Cajamarca. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.

- Rincón M., Rincón N., Araujo I., Díaz A. & Mata J. (2010). Estabilización anaerobia mesofílica y termofílica de lodos activados provenientes de la industria cervecera. Ciencia e ingeniería Neogranadina.
- Rodríguez, N. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de filtro biológico en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas, sector Las Lomas, Moyobamba, 2015 – 2016. Moyobamba: Universidad Nacional de San Martín Tarapoto.
- Rubalcava, N.A. (2020). Estudio de la eficiencia energética en una planta de tratamiento de aguas residuales comercial, en Mérida Yucatán [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica en Yucatán, A.C.
- Sánchez L. (2022). Operación mensual de la planta de tratamiento del Centro de Investigación y Saneamiento del río Atoyac ABRIL. Secretaria de Medio Ambiente. Gobierno municipal de Puebla. Disponible en: <https://cemuhi.pueblacapital.gob.mx/informate-y-conoce/biodiversidad/item/273-reporte-ptar-del-cisa-abr-2022>
- Sánchez L. (2022). Operación mensual de la planta de tratamiento del Centro de Investigación y Saneamiento del río Atoyac FEBRERO. Secretaria de Medio Ambiente. Gobierno municipal de Puebla. Disponible en: <https://cemuhi.pueblacapital.gob.mx/informate-y-conoce/biodiversidad/item/272-reporte-ptar-del-cisa-feb-2022>
- Sánchez L. (2022). Operación mensual de la planta de tratamiento del Centro de Investigación y Saneamiento del río Atoyac JUNIO. Secretaria de Medio Ambiente. Gobierno municipal de Puebla. Disponible en: <https://cemuhi.pueblacapital.gob.mx/informate-y-conoce/biodiversidad/item/274-reporte-ptar-del-cisa-jun-2022>

Secretaría de Energía SENER (2022). Balance Nacional de energía. Disponible en:

<https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT (2021). NORMA Oficial

Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Secretaría de gobernación.

Valdivielso A. (2023). ¿Qué es un sistema de lodos activados? [En línea]. Iagua. Disponible en:

<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados>

Varnero, P. M. (2011). Manual de biogás. Manual (pp.38). Gobierno de Chile, Ministerio de

Energía, Santiago de Chile. Disponible en: <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

7. Apéndices

Apéndice 1. Datos de los únicos reportes del Centro de Investigación y Saneamiento del río

Atoyac en donde se muestran los valores de DQO del influente.

2022	DQO promedio Influyente (mg/L)	DQO promedio Efluente (mg/L)	Link de información
Enero	1138	695	https://cemuhi.pueblacapital.gob.mx/informate-y-conoce/biodiversidad/item/272-reporte-ptar-del-cisa-feb-2022
Febrero	1574.571	791.571	
Marzo	1191	627	

Abril	1381.333	843.667	https://cemuhi.pueblacapital.gob.mx/informate-y-conoce/biodiversidad/item/273-reporte-ptar-del-cisa-abr-2022
Mayo	1756.6	1101.8	https://cemuhi.pueblacapital.gob.mx/informate-y-conoce/biodiversidad/item/274-reporte-ptar-del-cisa-jun-2022
Junio	1488	774.667	
Promedio	1421.584	805.6175	
Total			

Apéndice 2. Ubicación de las PTAR que administra el municipio de Puebla a excepción de la PTAR Rastro municipal y PTAR Mira Atoyac.



Fuente: Google Maps 2024.

Apéndice 3. Resultados generación de metano y de electricidad de las PTAR entre 50 a 100 L/s del estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

Estado	PTAR	Proceso	Caudal L/s	Metano m ³ /d	Energía kWh/año
Aguascalientes	Jesús María	Lodos activados	95	152.06	199,728.00
Aguascalientes	Rincón de Romos	Lodos activados	91	363.13	476,894.40
Ciudad de México	Santa fe	Lodos activados	65	291.46	382,724.40
Ciudad de México	San Lorenzo	Lodos activados	60	130.68	171,608.40
Guanajuato	Pemex Salamanca	Lodos activados	60	322.42	423,370.80
Estado de México	Lechería	Lodos activados	82	390.46	512,722.80
Estado de México	Los Itzicuaros	Lodos activados	80	217.56	285,663.60
Michoacán	Municipal No.1	Lodos activados	80	148.1	194,472.00
Tampico	Norponiente	Lodos activados	62	124.15	163,023.60

Puebla	PARQUE ECOLOGICO	Biodiscos lodos activados	80	2,308.94	7,322,080.3 8
Puebla	ACUAPUE	Lodos activados	50	1,443.09	4,576,300.2 4

Apéndice 4. Resultados generación de metano y de electricidad de las PTAR entre 150 a 250 L/s del estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

Estado	PTAR	Proceso	Caudal 1 (L/s)	Metano (m ³ /d)	Energía kWh/año
Aguascalientes	Los Arellanos	Lodos activados	170	275.42	361,700.40
Baja California	La Morita	Lodos activados	195	482.77	633,961.20
Ciudad de México	San Juan de Aragón	Lodos activados	175	740.52	972,447.60
Guanajuato	Irapuato II	Lodos activados	214	917.38	1,204,675.20
Nuevo León	Agua Ind. de Mty, S. de U	Lodos activados	240	1,916.64	2,516,923.20
Querétaro	Saastunja	Lodos activados	198	1,513.91	1,988,082.00
Puebla	BARRANCA DEL CONDE	Lodos activados	209	6032.10655 4	19,128,935.0 0

Apéndice 5. Resultados generación de metano y de electricidad de las PTAR entre 550 a 850 L/s del Estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

Estado	PTAR	Proceso	Cauda l (L/s)	Metano (m3/d)	Energía kWh/año
Coahuila	PTAR 3 AHMSA	Lodos activados	557	3,234.53	4,247,636.40
Coahuila	Piedras Negras	Lodos activados	700	908.86	1,193,550.00
Colima	Villa de Álvarez	Lodos activados	850	2,715.77	3,566,371.20
Ciudad de México	Lago de Texcoco 1	Lodos activados	800	3,756.06	4,932,493.20
Nuevo León	Pemex San Rafael	Lodos activados	825	6,468.66	8,494,747.20
Querétaro	San Pedro Mártir	Lodos activados	630	5,410.94	6,672,667.20
Sinaloa	El crestón	Lodos activados	726	2,141.57	2,812,310.40
Veracruz	Xalapa 1	Lodos activados	745	5,253.34	6,898,762.80
Puebla	ATOYAC SUR	Lodos activados	600	17317.05231	54,915,602.88
Puebla	PUEBLA ALSESECA	Lodos activados	758	21877.20942	69,376,711.64

Apéndice 6. Resultados generación de metano y de electricidad de las PTAR entre 1100 a 1500 L/s del Estudio Mantilla G. et al. (2017) y del municipio de Puebla.

Estado	PTAR	Proceso	Cauda l (L/s)	Metano (m3/d)	Energía kWh/año
--------	------	---------	------------------	------------------	--------------------

Chihuahua	Chihuahua Sur	Lodos activados	1350	7,456.28	9,791,665.20
Chihuahua	Planta Norte	Lodos activados	1161	945.01	1,241,029.20
Nuevo León	Noreste	Lodos activados	1241. 9	959.75	1,260,388.80
Guanajuato	León (Planta Municipal)	Lodos activados	1463	10,842.58	14,238,591.60
Puebla	SAN FRANCISCO	Lodos activados	1272	36712.15089	116,421,078.10