

Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México

Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico

Ismael Aguilar-Benitez¹

Perla A. Blanco²

¹El Colegio de la Frontera Norte (Colef), Monterrey, México, iaguilar@colef.mx

²Egresada del Programa de Maestría en Gestión Integral del Agua de El Colegio de la Frontera Norte (Colef), Monterrey, México, pablancojara@gmail.com

Autor para correspondencia: Ismael Aguilar-Benitez, iaguilar@colef.mx

Resumen

En este trabajo se examina la recuperación de energía de lodos de aguas residuales, mediante el aprovechamiento del metano generado en procesos anaerobios, como un mecanismo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se estudia la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo, Tamaulipas (PTAR-NL), cuya capacidad de diseño, nivel de eficiencia energética actual y calidad final de lodos hace relevante un ejercicio prospectivo. Para evaluar la eficiencia energética de la planta se utiliza un enfoque *benchmarking* con seis características clave en el uso de energía; se estima la producción potencial de energía eléctrica teórica a partir del metano potencialmente capturado, y se realiza un ejercicio de apreciación *ex-ante* de emisiones de GEI para proyectos de mecanismos de desarrollo limpio (MDL) en PTAR. Los resultados más importantes son: a) que el aprovechamiento de lodos para la generación de energía en PTAR-NL disminuiría las emisiones

de GEI por el tratamiento de lodos en 21%; b) la generación de energía eléctrica mediante recuperación de metano aportaría el 14% de la energía requerida por la planta, y c) además, la eficiencia energética de la planta mejora en 2%. Para la implementación de recuperación de metano en PTARs aeróbicas con tratamiento de lodos en condiciones anaeróbicas se requiere de estudios específicos de factibilidad técnica, legal y económica; sin embargo, este ejercicio muestra relevantes beneficios ambientales en su implementación.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, lodos residuales, recuperación de metano, eficiencia energética, emisiones GEI.

Abstract

In this paper, we studied energy recovery from anaerobic digestion of sewage sludge in Waste Water Treatment Plants (WWTP), as a mechanism to reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions and improve energy efficiency. We analyzed the case of the International Wastewater Treatment Plant at Nuevo Laredo (WWTP-NL), which is considered energy efficient and produces good quality sewage sludge. We utilized a benchmarking approach based on a multiparametric model with six key variables to evaluate the energy use efficiency of the WWTP-NL. The prospective electric energy production was estimated based on the potential amount of methane recovered. Then, we compared baseline and projected GHG emissions. For this purpose, we used the Clean Development Mechanism (CDM) methodology to project the recovery of biogas in wastewater by introducing an anaerobic treatment system for sludge treatment. The main findings of this prospective exercise are that the implementation of an energy recovery project in the WWTP-NL would: reduce the plant's GHG by 21%; supply 14% of the energy required by the plant; and improve the energy efficiency of the plant by 2%. Specific technical, legal and economic feasibility studies are required for the practical implementation of this theoretical energy WWTP recovery project; nonetheless, this exercise shows that the project would generate clear environmental benefits.

Keywords: Wastewater treatment, sewage sludge, methane recovery, energy use efficiency, GHG emissions.

Fecha de recibido: 16/05/2017

Fecha de aceptado: 07/09/2017

Introducción

En el Informe Mundial sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 se plantea que una mejor gestión de las aguas residuales implica no sólo la eliminación de contaminantes sino también y de manera importante, la reutilización de las aguas tratadas y la recuperación de los subproductos, como es el caso de los lodos (WWAP, 2017). Sin embargo, en México, como en otros países, el agua tratada típicamente regresa a los ecosistemas, mientras que los lodos por lo general son dispuestos en rellenos sanitarios. Esta concepción lineal de los procesos de saneamiento permite una fuga de material y/o energía, así como la contaminación ambiental derivada de los procesos de tratamiento, manejo y uso de energía no renovable. Tanto las aguas como los lodos contienen energía y nutrientes que pueden ser aprovechados (Tabasová, Kropác, Kermes, Nemet, & Stehlík, 2012). La recuperación de energía tiene el beneficio de reducir emisiones, en específico de gas metano (CH_4), cuya capacidad para atrapar el calor en la atmósfera es 25 veces mayor que la del bióxido de carbono (CO_2) y es un importante precursor del ozono troposférico (Noyola, Paredes, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2016). En México, 709 plantas, alrededor de 30% del total en funcionamiento, utilizan el proceso de lodos activados y generan el 61% de la capacidad instalada (Conagua, 2014); estas plantas potencialmente pueden recuperar energía mediante la digestión anaerobia de sus lodos y cubrir una parte de sus requerimientos de energía con el consecuente ahorro de costos.

En el norte de México, a pesar de ser una de las regiones con mayor porcentaje de tratamiento de aguas residuales del país (Peña de la, Ducci, & Zamora, 2013), sólo en algunas ciudades se vende el agua tratada para uso industrial, riego de áreas verdes u otros usos, como riego en campos de golf. En general, los lodos son considerados desechos y son dispuestos en rellenos sanitarios. Para su disposición final, los lodos producidos en una planta de tratamiento deben cumplir con las normas oficiales mexicanas NOM-004-Semarnat-2002 y NOM-083-Semarnat-2003. La primera especifica los límites máximos permisibles de contaminantes y la calidad de los lodos residuales para utilizarse como biosólidos y disposición final; la segunda define los criterios para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras

complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

El manejo, tratamiento y disposición de las aguas residuales municipales contribuyen a la emisión de GEI a través de los procesos de descomposición de la materia orgánica contaminante y de las actividades de tratamiento asociadas (Noyola, Morgan-SagastumeL, & Güereca, 2013; Noyola *et al.*, 2016). Las aguas residuales tratadas en medio anaeróbico pueden ser una fuente de CH₄ y de emisiones de óxido nitroso (N₂O) cuando no se recupera energía, mientras que las plantas con tratamiento aeróbico contribuyen a las emisiones indirectas por su alto consumo energético. La selección entre procesos de tratamiento aeróbico o anaeróbico tiene entonces un importante impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (Noyola *et al.*, 2016). Se estima que las PTAR generan el 5% de las emisiones totales de metano en el mundo y se considera un incremento de alrededor de 28%, de 477 a 609 millones de toneladas métricas de CO₂ equivalentes (MtCO₂e) de 2005 a 2030 (EPA, 2012).

En México, el incremento de emisiones de metano originadas por aguas residuales municipales para el periodo 1990-2010 fue de 126.6%, con emisiones de 3 948.2 gigagramos (Gg) de GEI —un Gg equivale a mil toneladas— y 8 946.5 Gg de CO₂ equivalente, con una tasa de crecimiento medio anual de 4.2% (Semarnat-INECC, 2012). Este incremento se debe en parte al impulso dado en las últimas décadas al tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales; de 2000 a 2012, el caudal de aguas residuales tratadas se duplicó (Peña de la *et al.*, 2013). En 2010 se contaba con 2 186 PTARs en México; las tecnologías de tratamiento más utilizadas eran lagunas de estabilización (35%) y lodos activados (30%) (Conagua, 2011). Para finales de 2014, el número de plantas en operación aumentó a 2 337, y se tenía una capacidad total instalada de 151 883.43 l/s, con un caudal tratado de 111 253.51 l/s, con lo cual se reportó una cobertura de tratamiento de aguas residuales de 52.7% (Conagua, 2014). Para 2030 se proyecta que la cantidad de metano generada por las aguas residuales en México será de 58.1 MtCO₂e (EPA, 2012). Esto hace necesario un cambio de perspectiva, en el que el manejo de aguas residuales se realice de manera integral, incluyendo el reúso no sólo de aguas sino también de los lodos (Limón, 2013). Desde 2008, la Conagua ha promovido el reúso de las aguas residuales tratadas y se han publicado dos normas oficiales mexicanas vinculadas con la infiltración de agua a los acuíferos sobreexplotados, con el fin de contribuir a su recarga artificial; la NOM-015-Conagua-2007 y NOM-014-Conagua-2003 (Peña de la *et al.*, 2013).

Para disponer de los lodos, éstos deben ser estabilizados para reducir la atracción de vectores, los olores y riesgos a la salud, además de ser deshidratados para reducir su volumen. Los procedimientos para tratar los lodos varían según la fuente y el tipo de aguas residuales de las que se derivan, del proceso utilizado para tratamiento de las aguas y del método de disposición al que se destinan (Ramírez, Cardoso, & Moeller, 2009). La técnica de lodos activados requiere del suministro de energía eléctrica para transferir oxígeno al agua y a los microorganismos, lo que se realiza con equipo electromecánico (aireadores mecánicos, compresores). En el sistema aerobio, un 65% de la energía producida por el metabolismo microbiano se transforma en lodos, mientras que el 35% restante se disipa como resultado de la liberación de energía (Noyola *et al.*, 2013). Existen varias opciones para la reutilización de lodos, por ejemplo, pueden utilizarse como fertilizante mediante el composteo o aprovechar su potencial energético mediante diversos métodos (Tabasová *et al.*, 2012; Lazarova, Peregrina, & Pascal, 2012). Esta segunda opción puede permitir mejorar la eficiencia energética de la PTAR y reducir las emisiones de metano.

Una forma directa de recuperación de metano en las PTAR consiste en utilizar procesos de tratamiento de aguas residuales con digestión anaerobia; otra opción consiste en reemplazar el tratamiento aerobio de lodos primarios por tratamiento anaerobio y captura de gas. Los lodos tienen un alto contenido orgánico y son apropiados para la digestión anaeróbica. La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que los lodos, mediante la acción de un grupo de bacterias y en ausencia de oxígeno, se descomponen en biogás y una mezcla de productos minerales (Bachmann, Jansen, Baxter, Bochmann, & Montpart, 2015). El producto final de este proceso es el biogás, compuesto principalmente de CH_4 (entre 60 y 70%), CO_2 (un 30%), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), alrededor de 3% cada uno. Aunque lo más recomendable es utilizar directamente el tratamiento anaerobio de aguas residuales, para aprovechar la mayor digestibilidad y alto contenido de los lodos primarios comparados con los lodos activados, en muchas plantas la tecnología ya establecida haría costosa esa sustitución. En México sólo se han construido dos PTAR con procesos de tratamiento de aguas residuales con digestión anaerobia y aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica: El Ahogado, en la zona conurbada de Guadalajara, Jalisco, con proceso de lodos activados y con capacidad instalada de hasta 2.25 metros cúbicos por segundo, genera hasta el 78% de la energía eléctrica que requiere; y la PTAR San Pedro Mártir en la Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ), con proceso dual, que tiene una capacidad de tratamiento de 0.75 metros cúbicos por segundo y genera 69% de la energía eléctrica que utiliza. Otra PTAR, aún en construcción, que utilizará digestión anaerobia para

cogeneración de energía térmica y eléctrica es la PTAR Atotonilco. En la planta de tratamiento de Atotonilco, planeada con una capacidad promedio para tratar 23 m³/s durante el estiaje y 60% de las aguas residuales generadas en el valle de México, se aprovechará el gas metano y se pretende que genere alrededor de 60% de la energía requerida para su operación (Peña de la *et al.*, 2013).

Publicaciones recientes han mostrado que un escenario de plantas con una combinación de tecnologías aerobia-anaerobia es una mejor opción cuando se utiliza la cogeneración de electricidad en sitio, que un escenario de tecnología completamente aerobia; esa combinación de tecnologías generaría una reducción de hasta 27% en emisiones para 2030 (Noyola *et al.*, 2016). Dos PTAR en México que utilizan el proceso de digestión anaerobia para tratamiento de lodos son la PTAR de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, y la de la ciudad de Culiacán, Sinaloa; estas plantas aprovechan parte del gas metano como combustible para calentar los digestores y el resto del gas es incinerado.

En PTAR aeróbicas con tratamiento de lodos en condiciones anaeróbicas y captura de biogás es posible abastecer el total de la demanda energética del digestor y una fracción de la energía eléctrica demandada por el sistema de aireación de lodos activados. Además, se genera energía calorífica que puede utilizarse para calentar el digestor hasta su temperatura de operación; utilizando intercambiadores de calor adecuados se pueden recuperar hasta 7 400 kJ/h de calor por cada kW alimentado al generador (Nolasco, 2010). La energía eléctrica producida genera emisiones de gases de efecto invernadero neutra respecto del carbono, pues éste se genera en el ciclo natural del carbono (Wiser, Schettler, & Willis, 2010; Jorgensen, 2009).

En este trabajo se examina el potencial de recuperación de metano para generación de energía eléctrica en la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nuevo Laredo (PTAR-NL), Tamaulipas, una planta considerada eficiente en el uso de energía y calidad de biosólidos generados (ver Tabla 1). Esta alternativa contribuiría a una mayor reducción de emisiones directas e indirectas de las PTARs que un escenario de recuperación de metano para su quema en flama, el cual es considerado como una buena práctica por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). También se plantea como una alternativa viable para PTARs que actualmente operan con tratamiento aeróbico de lodos primarios o sin tratamiento de los mismos, en lugar de una conversión de tecnología de tratamiento aerobio a anaerobio de las aguas residuales. En particular, este trabajo se propone:

- a) Evaluar la eficiencia energética de la PTAR-NL y su potencial de energía derivado del aprovechamiento de sus lodos.
- b) Calcular el ahorro de energía en la PTAR-NL generado a partir de la recuperación de metano.
- c) Estimar el potencial de reducción de emisiones de GEI de la PTAR-NL como resultado de la recuperación de metano.

La PTAR-NL está sobre la margen derecha del río Bravo, en el municipio de Nuevo Laredo, al norte del estado de Tamaulipas, México. Es una planta de tratamiento secundario aerobio tipo zanjas de oxidación, con una capacidad en diseño para tratar de 1 360 l/s de agua residual urbana. Las aguas residuales de la ciudad de Nuevo Laredo son principalmente de origen doméstico y comercial; esta particularidad es importante debido a que una composición de aguas residuales con bajas cantidades industriales permite una menor variabilidad de las características de los lodos producidos.

El tratamiento de aguas residuales y lodos de la PTAR-NL cubre los procesos siguientes (ver Figura 1): el agua residual cruda proviene de dos colectores conocidos como El Ribereño y El Coyote, y llega por gravedad a dos cárcamos de influente, los cuales cuentan con tres bombas sumergibles para lodos con capacidad máxima de bombeo de 600 l/s cada una. En 2013 se puso en funcionamiento solamente uno de estos dos cárcamos, enviando un flujo promedio de agua residual de entre 850 y 910 l/s al sistema de tratamiento (Blanco, 2014). Este flujo promedio se mantiene en esos niveles para 2016. Después de pasar por dos cribas, el agua residual llega a dos desarenadores tipo vórtex en los cuales se separan las arenas inorgánicas para su disposición en tanques contenedores.

El agua residual pretratada llega por gravedad hasta las zanjas de oxidación. La PTAR-NL cuenta con seis zanjas de oxidación tipo carrusel para aireación extendida; cada zanja mide 98.6 m de longitud, 38.4 m de ancho y 6.7 m de altura; tiene una capacidad hidráulica individual de 17 850.7 m³. En 2013 se encontraban en funcionamiento sólo 4 de las 6 zanjas de oxidación debido a que la PTAR-NL operaba al 67% de su capacidad de diseño.

Los efluentes de las zanjas de oxidación pasan por gravedad a la caja de distribución para abastecer a los clarificadores secundarios. El sistema de clarificadores está conformado por cuatro tanques circulares de concreto armado de 50 metros de diámetro y 4 m de altura, con un vertedor para el efluente de 47.8 m de diámetro y una profundidad de 6.35 m. En 2013 se encontraban en operación sólo 2 de estas 4 unidades clarificadoras.

El sistema de bombeo de recirculación consiste en seis bombas centrífugas horizontales y es utilizado para enviar los lodos activados sedimentados hacia la entrada de la obra de cabeza (retorno de lodos). En 2013, debido al flujo que se manejaba, solamente una bomba de lodos estaba en funcionamiento para dar servicio a los dos clarificadores en operación.

La cloración se realiza en un tanque de contacto dividido en dos secciones; cada una mide 32.7 m de longitud, 14 m de ancho y 3.6 m de profundidad. Se utilizan dos evaporadores de cloro, cada uno con capacidad de 6 000 lb/día; los evaporadores mandan el gas cloro por ductos hasta dos cloradores. Finalmente, el agua residual ya tratada y desinfectada es descargada al arroyo El Coyote en la zona de inundación del río Bravo; en ocasiones se envía agua tratada al cárcamo de bombeo de reúso, para riego de jardines y limpieza, así como riego de áreas verdes del Club de Golf "Campestre" de Nuevo Laredo. Sin embargo, la mayor parte del efluente de la PTAR-NL se descarga en una zona de inundación del río Bravo, un cuerpo de agua internacional, y debe cumplir con parámetros establecidos por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) división México-Estados Unidos.

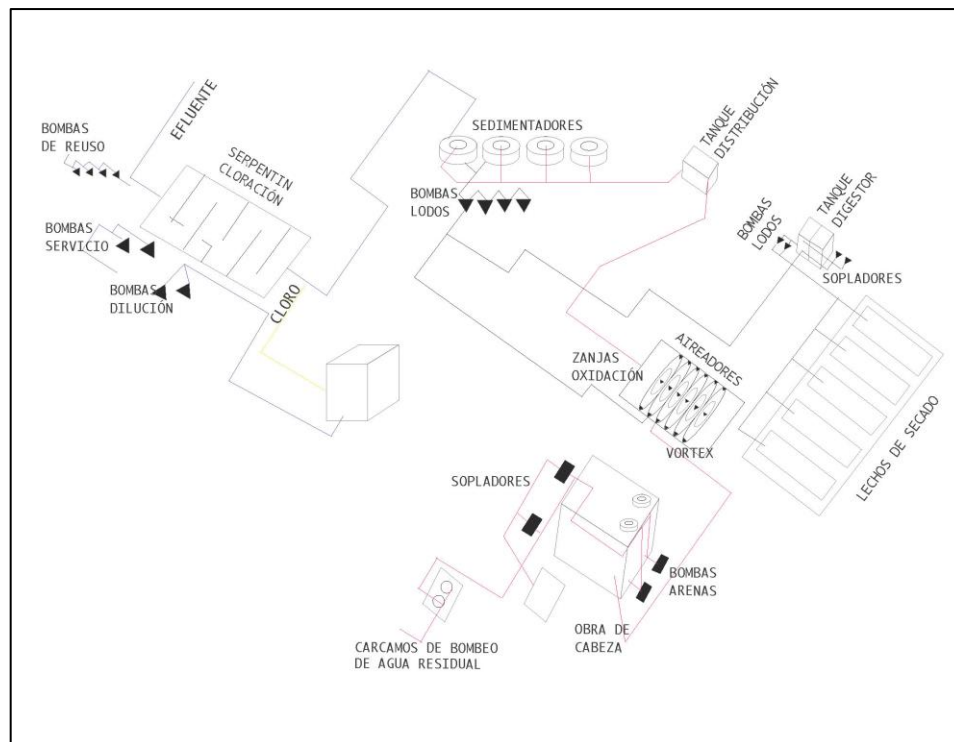


Figura 1. Diagrama general de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR-NL. Fuente: adaptado de Watergy México A. C. y COCEF (2014), con base en recorrido de PTAR NL.

De acuerdo con el manual de operación de la PTAR-NL, la planta está diseñada para generar 28 l/s de lodos de purga cuando trabaja al 100% de su capacidad. El proceso de tratamiento de lodos se describe enseguida.

Los lodos procedentes de los clarificadores secundarios llegan por medio de bombeo a un tanque rectangular de concreto armado que tiene un volumen de 2 937 m³, y reciben aireación por medio de tres sopladores de lóbulos y difusores de burbuja fina ubicados en el fondo del tanque. En el tanque de estabilización, el lodo se espesa al 1%, lo que ocurre en unas 24 horas. Una vez estabilizados, los lodos son conducidos por medio de tres bombas de desplazamiento positivo tipo tornillo hacia los lechos de secado para su disposición final. En 2013 se utilizaba un equipo para bombeo de estos lodos y trabajaba sólo 12 h/día cada dos días. Al final del tratamiento de lodos se encuentran 80 tanques de concreto armado con camas filtrantes de arena y grava graduada. Cada uno mide 15 m de ancho, 35 m de longitud y 0.5 m de profundidad. En esos lechos de secado se elimina el exceso de humedad de los lodos para después pasar a su disposición final como desecho en base seca. Se producen 10 ton/día de lodos con calidad final reportada como excelente o clase "A", según la NOM-004-Semarnat-2002, por lo que pueden reutilizarse incluso para usos con contacto directo con personas (ver Tabla 1). El 12% generado se utiliza como composta localmente. La principal desventaja en el uso de composta es que debe ser transportada hasta el lugar de utilización, generando emisiones de GEI por su transporte. Para el aprovechamiento de biosólidos como composta a mayor escala y debido a que las actividades económicas principales de Nuevo Laredo son el comercio y los servicios, se requiere de transportar el material a áreas agrícolas localizadas a mayor distancia; esto generaría una mayor emisión de GEI.

Tabla 1. Parámetros de los lodos residuales de la PTAR-NL, marzo de 2013. Fuente: información proporcionada por el laboratorio de la PTAR-NL.

Parámetro	Resultado	NOM-004-Semarnat-2002	Unidades
		Lodos excelentes	

Arsénico	< 5.0	41	mg/kg
Cadmio	< 2.0	39	mg/kg
Cobre	117.1	1 500	mg/kg
Coliformes Fecales	< 300	< 1 000	NMP/gBS
Cromo total	21.02	1 200	mg/kg
Huevos de helminto	0	< 1	Huevos/gBS
Mercurio	0.65	17	mg/kg
Níquel	13.6	420	mg/kg
Plomo	28.8	300	mg/kg
Salmonella SPP	< 3	< 3	NMP/gBS
Zinc	633.6	2 800	mg/kg

Materiales y métodos

El análisis de la PTAR-NL se integra en este trabajo por tres componentes: uno, la evaluación de la eficiencia energética de esa planta; dos, la estimación del potencial de energía eléctrica y su efecto en su eficiencia energética con y sin proyecto; y tres, se estima la reducción de emisiones de GEI contrastando la línea base y emisiones con el proyecto de recuperación del metano potencialmente generado en procesos anaerobios de lodos residuales con la generación teórica de energía eléctrica.

Para el análisis de la eficiencia energética de la PTAR-NL se aplicó el procedimiento tipo *benchmarking* propuesto por la American Water Works Research Foundation (AWWA Research Foundation, 2007). La AWWA Research Foundation desarrolló un modelo multiparamétrico que captura las características externas clave para el uso de energía en PTARs. Para desarrollar ese modelo, se definió una muestra estadística de 266 PTARs en los Estados Unidos, y se recolectó información sobre uso de energía y

características descriptivas completas de los parámetros requeridos. Mediante un análisis econométrico se evaluó la correlación de 32 parámetros con el uso de energía, tratando de definir las variables con mayor peso. Finalmente, se determinó un modelo que relaciona el uso de energía como variable dependiente con seis variables independientes: flujo promedio de influente, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el influente, DBO en el efluente, factor de carga del influente, uso de filtro percolador y remoción de nutrientes. Los coeficientes que generó este modelo y que se utilizan en este trabajo se reportan en la ecuación (1).

$$\ln(E_s) = 15.8741 + 0.8944\ln(I_{prom}) + 0.4510\ln(IDBO) - 0.1943\ln(EDBO) - 0.4280(IFC) - 0.3256(FP) + 0.1774(RN) \quad (1)$$

Donde:

$\ln(E_s)$ = uso esperado promedio de energía, con una transformación logarítmica para tomar en cuenta el rango de variación en el tamaño de las plantas.

I_{prom} = flujo promedio diario en el influente.

$IDBO$ = DBO en el influente.

$EDBO$ = DBO en el efluente.

IFC = factor de carga del influente ($I_{prom}/I_{diseño} \times 100$).

FP = uso de filtro percolador (sí = 1, no = 0).

RN = remoción de nutrientes (RN , sí = 1, no = 0).

La aplicación de los coeficientes del modelo (ecuación (1)) permite estimar el uso esperado promedio de energía ($\ln(E_s)$), dado el conjunto de los seis parámetros establecidos. El primer paso para este análisis consiste en calcular el uso de energía total por fuente (conversión a kBTU/año). Para ello se aplica un factor de origen de energía que corrige por las pérdidas según el origen de la energía utilizada. El segundo paso consiste en estimar el uso promedio de energía para una planta con características específicas. Aplicando logaritmo natural se obtiene el puntaje o *score* de la planta con su uso actual de energía ($\ln(E_{as})$). Para evaluar el desempeño en uso de energía de la planta de estudio con el desempeño de la planta típica de la muestra del estudio original (con

características similares) se evalúa la diferencia entre el puntaje con el uso actual ($\ln(E_{as})$) y el puntaje estimado ($\ln(E_s)$).

Donde E_{as} = uso actual de energía, el cual se ajusta por el factor de origen (en este caso, electricidad o gas metano) para convertir la cantidad total de energía a BTU (British Thermal Units):

$$E_{as} = \sum E_u (FS) \quad (2)$$

E_u = energía requerida KWh/año.

F_S = factor de origen de la energía.

Para comparar el desempeño en uso de energía de la planta de estudio con el mejor uso observado de energía en la muestra de plantas estudiadas, se calcula un factor de ajuste (F_{adj}), dividiendo el puntaje estimado (predicción) entre el puntaje promedio 17.8 (correspondiente al *score* medio obtenido en el estudio de AWWA Research Foundation (2007)).

$$F_{adj} = \ln(E_s)/17.8 \quad (3)$$

Se aplica el factor de ajuste obtenido para la localización en la curva de distribución del uso de energía ajustado ($\ln(E_{adj})$).

$$\ln(E_{adj}) = \ln(E_{as})/F_{adj} \quad (4)$$

Para evaluar la eficiencia energética sin recuperación de metano se ubica el valor ajustado en los percentiles de la Figura 2. La localización en el percentil de la curva indica qué tan cerca se encuentra el uso de energía de la planta de estudio del mejor uso observado de energía (será mejor cuanto más cerca se encuentre a un *score* de 100).

Finalmente, para comparar el desempeño actual en uso de energía con el desempeño potencial que tendría con proyecto de recuperación de

metano, se aplica la ecuación (2) con los factores de corrección para las dos fuentes de energía: energía eléctrica (11.1 Kbtu/kWh) importada al sistema y energía eléctrica generada por biogás (21.21 Kbtu/m³). Se aplica el factor de ajuste y se ubica el nuevo valor ajustado en los percentiles de la Figura 2. La mejora en eficiencia energética con aprovechamiento de lodos para la generación de energía eléctrica se estima como la diferencia entre los puntajes o *score* de la planta con su uso energía $\ln(E_{as})$ sin proyecto y con proyecto, normalizadas con el factor de ajuste estimado (F_{adj}).

Para la estimación del potencial de generación de energía se emplearon ecuaciones cinéticas de predicción de la producción de metano para digestores anaeróbicos simples de mezcla completa de una sola etapa con proceso de digestión mesofílica (Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, Stensel, Tsuchihashi, & Burton, 2014). Se identifica este tipo de digestor para el proyecto teórico de aprovechamiento de metano debido a que es el más común y de fácil operación, lo que disminuye costos de adaptación. En general, las PTARs en México operan a temperatura ambiente, que corresponde al nivel más bajo del rango mesofílico (30-38 °C); la mayoría de reactores anaeróbicos operan bajo condiciones mesofílicas debido a su mayor estabilidad, comparados con los termofílicos (Monroy, Fama, Meraz, Montoya, & Macarie, 2000). Utilizar temperaturas termofílicas (50-57 °C) requiere utilizar mayores cantidades de energía para el proceso, y genera un sobrenadante con grandes cantidades de sólidos disueltos y mayor potencial de mal olor (Appels, Baeyens, Degreve, & Dewil, 2008). En este trabajo no se revisan algunas opciones técnicas que mejorarían la eficiencia en producción de biogás, por ejemplo, algunos métodos de pretratamiento de lodos o combinación con grasas u otros materiales. Para estimar la cantidad de producción de gas metano se utilizan las ecuaciones (5) y (6) (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014), y variables que se describen a continuación:

$$V_{CH4} = (0.35) [S_0 - S] (Q) (1 \text{ kg}/103\text{g}) - 1.42Px] \quad (5)$$

Donde:

V_{CH4} = volumen de metano producido (m³/d) bajo condiciones estándar.

El factor de conversión teórica para la cantidad de metano producido de la conversión de 1 kg de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) en

condiciones estándar (0 °C y 1 atm) = 0.35 m³ metano/kg DQO (Meda, Lensh, Schaum, & Cornel, 2012).

S_0 = bDQO en influente g/m³.

S = bDQO en efluente g/m³.

Q = caudal de lodos m³/d.

P_x = masa neta de sólidos biológicos sintetizados por día kg/d.

La masa neta de sólidos biológicos sintetizados por día (P_x) puede ser estimada con la ecuación siguiente, empleada para biodigestores de alta carga con una mezcla completa (agitador moto rizado que permita la mezcla homogénea de los lodos), sin recirculación (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014):

$$P_x = [YQ(S_0 - S) (1 \text{ kg}/103\text{g})]/1 + b(SRT) \quad (6)$$

Donde:

Y = coeficiente de rendimiento, obtenido de la combinación de los procesos de fermentación y metanogénesis.

Q = caudal, m³/d.

S_0 = bDQO en influente g/m³.

S = bDQO en efluente g/m³.

b = coeficiente endógeno de descomposición (fermentación, metanogénesis).

STR = tiempo de retención de sólidos; para digestión de alta carga, el rango es de 15 a 20 días en la práctica (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014).

Los valores típicos de reacción anaeróbica para Y y b son: para el coeficiente de rendimiento (Y), se encuentra en un rango de 0.05 a 0.10 g VSS/g bDQO; para el coeficiente endógeno (b), el rango para lodos

domésticos es 0.02 a 0.04 g/g.d (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014; Appels *et al.*, 2008).

Como tercer componente se utilizó la metodología aprobada para proyectos de mecanismos de desarrollo limpio (MDL) en PTAR AMS IIH "Recuperación de Metano en Tratamiento de Aguas Residuales" (UNFCCC, 2014; Nolasco, 2010). Esta metodología estima la disminución de emisiones GEI con la implementación de proyectos MDL, contrastándola con las emisiones con una línea de base. La metodología AMS IIH incluye medidas para la recuperación de biogás de materia orgánica por medio de varias opciones. Uno de los proyectos MDL consiste en la sustitución de un tratamiento aeróbico de lodos por un sistema anaeróbico con recuperación de gas y quema de metano en flama, o su uso para generación de electricidad en PTAR.

La línea base para este caso se identifica como: "Digestión aeróbica de los lodos generados" en una PTAR con tratamiento aeróbico. Las emisiones base son aquellas liberadas bajo las condiciones actuales de operación de la planta. El proyecto potencial es caracterizado como: "Implementación de un sistema de digestión anaeróbico con recuperación de metano" (metodología AMS-IIH) de los lodos generados por tratamiento aerobio de aguas residuales (Nolasco, 2010). El cálculo simplificado de emisiones de base y proyecto se basa en las siguientes ecuaciones.

$$ER = BE - PE \quad (7)$$

E_R = reducción de emisiones

B_E = emisiones de base

P_E = emisiones del proyecto

Para estimar las emisiones de base y con proyecto se utilizan las siguientes ecuaciones (8) y (9):

$$BE = (QL) (DOC) (MCFS) (DOCF) (F) (16/12) (UF) (GWPC_{H4}) + (EC) (EF) \quad (8)$$

$$PE = (QL) (DOC) (DOCF) (F) (16/12) (L - EG) (EF) \quad (9)$$

Donde:

QL = cantidad de lodo (t/año).

DOC = contenido de materia orgánica en el lodo generado (0.05 para lodo doméstico).

MCF_S = factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento del lodo.

$DOCF$ = fracción de contenido orgánico (DOC) que se transforma en biogás (0.5).

F = fracción de metano en el biogás: 0.7.

UF = factor de corrección por incertidumbre (0.94).

GWP_{CH_4} = potencial de calentamiento global del metano (21 kgCO₂e/kgCH₄).

L = fracción de biogás que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización (valor sugerido 0.2).

EG = excedente de energía (generación-consumo del proyecto), que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (MWh/año).

EC = energía consumida en forma de electricidad consumo de la planta (MWh/año).

EF = factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/Mwh).

Para estimar el potencial de generación de energía eléctrica se asume la utilización de un motor de combustión interna a partir de gas. Los motores de combustión interna ofrecen como ventaja una baja emisión de óxidos de nitrógeno, con lo cual cumple con las regulaciones de emisiones a la atmósfera. Las eficiencias de los diversos motores de combustión interna que utilizan gas para la generación de energía eléctrica oscilan entre 30 y 42% (Wiser *et al.*, 2010); para este caso, se utilizó un parámetro de eficiencia de 35%. Es necesario notar que para la operación de un proyecto en planta se deben tomar en cuenta los escenarios de máxima y mínima generación de energía para disminuir los riesgos del manejo de gas y aumentar la eficiencia de todo el proceso.

Este estudio se enfoca a la reducción de las emisiones de GEI relacionadas con el manejo de lodos residuales de las PTAR, de los cuales el principal

es el metano. Por lo tanto, los impactos ambientales y el gasto de energía relevantes para el trabajo se limitan a los procesos de tratamiento y aprovechamiento de lodos y no se utilizan metodologías con propósitos más amplios, como el análisis de ciclo de vida, que haría necesario evaluar el proceso completo de saneamiento, incluyendo todas las entradas y salidas de los sistemas a evaluar y todos los vectores involucrados (aire, agua, suelo).

Resultados y discusión

Evaluación de la eficiencia energética

La PTAR-NL registra para su funcionamiento un consumo energético promedio mensual de 677 696 kWh, equivalente a un consumo anual de 8 132 356 kWh/año. La distribución del consumo de energía por área se puede observar en la Tabla 2. La estación de bombeo consume el mayor porcentaje de energía eléctrica de la planta (46%). Las zanjas de oxidación consumen el 37%; en este sentido, es la segunda área con mayor consumo.

Para analizar la eficiencia energética de la PTAR-NL se calculó el puntaje de la planta, siguiendo el método *benchmarking* de la AWWA Research Foundation, con su uso actual de energía (ecuación (2)):

$$E_{as} = \sum Eu (FS)$$

$$Eu = \text{energía requerida KWh/año} = 8\,132\,356 \text{ kWh/año}$$

$$FS = \text{factor de origen de la energía} = 11.1 \text{ kbtu/kWh}$$

$$E_{as} = \sum Eu (FS) = 8\,132\,356 \text{ kWh/año} (11.1 \text{ Kbtu/kWh}) = 90\,269\,151.6 \text{ kbtu/año}$$

$$\ln(E_{as}) = \ln(90\,269\,151.6 \text{ kbtu/año}) = 18.32$$

Tabla 2. Gasto energético promedio mensual de la PTAR-NL por área de proceso. Fuente: elaboración propia con datos proporcionados por Comapa Nuevo Laredo, Coordinación de Plantas de Tratamiento.

Área de proceso	Gasto energético (kWh)	Porcentaje promedio
Estación de bombeo	313 428	46
Obra de cabeza	12 912	2
Zanjas de oxidación	251 864	37
Clarificadores	1 666	0.25
Retorno de lodos	32 600	5
Cloración	24 763	4
Tanque de lodos	14 949	2
Áreas generales	25 514	4

Para evaluar la diferencia entre el puntaje con el uso actual ($\ln(E_{as})$) y el estimado ($\ln(E_s)$), se aplican los coeficientes del modelo multiparamétrico de la AWWA Research Foundation (ecuación (1)) y los datos sobre características de la PTAR-NL obtenidos en planta. El influente promedio diario para 2016 en la PTAR-NL fue de 19.73 Mgal/d; la DBO promedio en el influente fue de 160.71 mg/l, mientras que el promedio por día de DBO en el efluente fue 3.175 mg/l; el factor de carga del influente fue calculado con el cociente entre influente promedio 864.66 l/s para 2016 y el influente de diseño (1 360 l/s). En este caso no se consideraron filtro percolador ni remoción de nutrientes en el proceso.

Tabla 3. Valores de los parámetros para la generación de biogás en PTAR-NL. Fuente: cálculos propios con datos obtenidos en la planta (Coordinación de Plantas de Tratamiento) y parámetros estimados en Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014.

Parámetro	símbolo	Valor	Unidades
bDQO en influente	So	160.71	mg/l
bDQO en efluente	s	3.175	mg/l
Caudal de lodos	Q	74 706.62	m ³ /d
Coeficiente de rendimiento	Y	0.08	gSVS/g bDQO
Coeficiente endógeno	b	0.03	1/d
Tiempo de retención de lodos	SRT	16	d
Factor promedio de conversión de metano a 35 °C		0.40	

Nota: SVS = sólidos volátiles suspendidos; bDQO = demanda química de oxígeno biodegradable.

Aplicando la ecuación (1):

$$\begin{aligned} \ln(ES) = & 15.8741 + 0.8944 \ln(19.7355 \text{ Mgal/d}) + 0.4510 \ln(160.71 \text{ mg/l}) \\ & - 0.1943 \ln(3.175 \text{ mg/l}) - 0.4280 \ln\{(864.66 \text{ l/s}/1\ 360 \text{ l/s}) \times 100\} \\ & - 0.3256(0) + 0.1774(0) = 18.83. \end{aligned}$$

El puntaje de la planta con su uso actual de energía calculado anteriormente ($\ln(E_{as}) = 18.32$) es menor que el puntaje promedio obtenido para plantas de la muestra en el estudio de *benchmarking* con características similares (18.83). Este resultado es importante, pues indica que, comparativamente, la PTAR-NL puede ser considerada como eficiente.

Para realizar el análisis gráfico del desempeño energético de la PTAR-NL, se localizan los puntajes obtenidos en los percentiles de la curva de distribución del uso de energía ajustado. La localización en la curva de distribución indica qué tan cerca está el desempeño de la planta, comparada con el mejor uso energético de plantas similares de la muestra del estudio de la AWWA Research Foundation. Para esto, primero se calcula el factor de ajuste (F_{adj}) con el resultado de uso actual de energía (ecuación (2)):

$$F_{adj} = \ln(Es)/17.8 = 18.83/17.8 = 1.05786.$$

$$\ln(E_{adj}) = \ln(E_{as})/F_{adj} = 18.32/1.05791 = 17.32$$

Un gasto energético ajustado de 17.32 se ubica aproximadamente en el percentil 87% de la curva (Figura 2). Una forma de interpretar este resultado es que la PTAR-NL se encuentra dentro del grupo de 13% de plantas de la muestra similares a ella con menor uso de energía. Este resultado sugiere que la PTAR-NL es eficiente en su consumo energético.

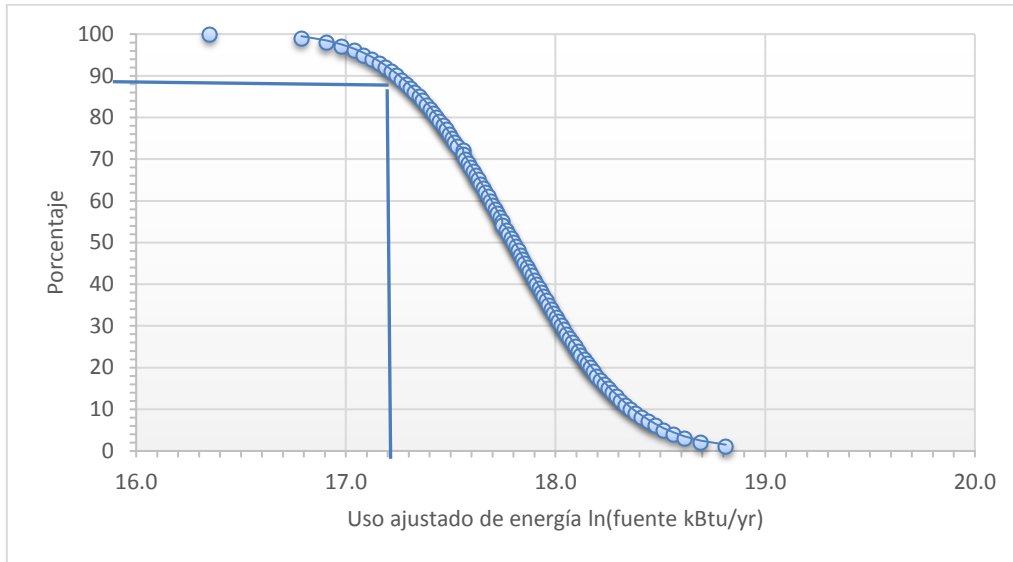


Figura 2. Uso ajustado de energía en PTAR-NL con recuperación de metano. Fuente: elaboración propia, adaptado de AWWA Research Foundation, 2007.

En nuestra evaluación del cambio en eficiencia energética se considera el aprovechamiento hipotético del 100% de lodos obtenidos en la PTAR-NL para la generación de energía. El proceso de digestión anaerobia puede ser alimentado con una mezcla de lodos primarios y secundarios, además de grasas atrapadas en los filtros o trampas de grasa de la entrada a la planta. Aunque podrían agregarse grasas o realizar pretratamientos de los lodos para incrementar la eficiencia de conversión, éstos no se toman en cuenta en nuestras estimaciones. Para estimar la cantidad generada de biogás, se asume el uso de un digestor anaerobio de alta velocidad de una etapa. Tenemos como datos el flujo promedio mensual de agua residual que recibe la planta (864.66 l/s), equivalente a 74 706.62 m³/d. Se estima la carga de DQO biodegradable en el influente, para lo cual se toma como dato el promedio diario de DBO en el mismo (160.71 g/m³);

se asume un porcentaje de remoción de DBO de 35% en el clarificador primario y de 60% de remoción de SST.

Carga de DQO biodegradable en influente = $(0.35) * (160.71 \text{ g/m}^3) * (74\,706.62 \text{ m}^3/\text{d}) * (1 \text{ kg}/10^3) = 4\,202.13 \text{ kg/d}$.

DQO biodegradable en el efluente = $4\,202.13 \text{ kg/d} * (1 - 0.6) = 1\,680.85 \text{ kg/d}$.

En la estimación de la generación de biogás se utilizan las ecuaciones (5) y (6), y se consideran los parámetros y datos de la Tabla 3, además de los datos estimados de bDQO en influente y efluente. Primero se calcula la masa de sólidos biológicos sintetizada diariamente usando la ecuación (6). El coeficiente endógeno (b) considerado para un digestor de mezcla completa es 0.03. El tiempo de retención hidráulica de los lodos (STR) es un parámetro que establece el tiempo que los lodos permanecen en el reactor de digestión anaeróbica y en el cual los microorganismos pueden transformar la materia orgánica en gas. Periodos muy cortos producen una degradación incompleta y menor cantidad de gas generado. Bajo condiciones mesofílicas de temperatura, promedio de operación de 35 °C, se estima como mínimo 10 días de retención (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014); aunque se recomienda en la práctica de 16 a 25 días (Bachmann *et al.*, 2015), en este ejercicio se utiliza el criterio de 16 días. Aplicando estos parámetros a la ecuación (6), se obtiene la masa neta de tejido celular o sólidos biológicos sintetizados diariamente en kilogramos por día (P_x):

$$P_x = [0.08 (4\,202.13 - 1\,680.85) \text{ kg/d}] / (1 + 0.03d - 1(16d)) = 136.28 \text{ kg/d}$$

Para estimar la cantidad de gas metano producido utilizamos la ecuación (5). El factor de conversión promedio de producción de metano a una temperatura promedio de 35 °C es 0.40 (Metcalf & Eddy Inc. *et al.*, 2014).

$$V_{CH_4} = (0.40 \text{ m}^3/\text{kg}) [(4\,202.13 - 1\,680.85) \text{ kg/d} - 1.42(136.28 \text{ kg/d})] = 815 \text{ m}^3/\text{d}.$$

Se estima una producción de 815 m³ de metano al día. Una vez estimada la cantidad de metano que potencialmente puede ser generada, es necesario estimar la cantidad de energía teórica. Para ello calculamos el

volumen de biogás generado, asumiendo un contenido de 70% de metano:

$$\text{Volumen de biogás} = 815 \text{ m}^3/\text{d}/0.70 = 1\,164.28 \text{ m}^3/\text{d}.$$

$$\text{Volumen de biogás mensual} = 1\,164 \text{ m}^3/\text{d} * 30 \text{ d/mes} = 34\,928 \text{ m}^3/\text{mes}.$$

$$\text{Volumen de biogás anual: } 34\,928 \text{ m}^3/\text{mes} * 12\text{m/año} = 419\,143 \text{ m}^3/\text{año}.$$

Para estimar la energía teórica por día se asume un valor calorífico superior de 27.8 MJ/m^3 o 7.72 kWh/m^3 (Ríos & Kaltschmitt, 2016), basados en el contenido de metano (70%). Con esos datos obtenemos la energía teórica por día:

$$\text{Energía teórica por día} = (1\,164 \text{ m}^3/\text{d})(7.72\text{kWh/m}^3) = 8\,986 \text{ kWh/d}.$$

$$\text{Energía teórica mensual} = (8\,986 \text{ kWh/d})(30 \text{ d/mes}) = 269\,582.4 \text{ kWh/mes}.$$

El paso siguiente consiste en estimar el potencial de energía eléctrica derivada del biogás. Para ello se asumió el uso de un motor de combustión interna a partir de gas, con un parámetro de eficiencia de 35%. Metcalf & Eddy Inc. *et al.* (2014) reportan una eficiencia en un rango de 37 a 42% para un motor de combustión interna, sin embargo, otras publicaciones (IDAE, 2007; IIE, 2012) reportan menor eficiencia (30-42%), por lo que se toma un criterio conservador de 35%.

$$E_{\text{eléctrica mes}} = (269\,582 \text{ kWh/mes})(0.35) = 94\,354 \text{ kWh/mes}$$

$$E_{\text{eléctrica anual}} = 94\,354 \text{ kWh} * 12 = 1\,132\,248 \text{ kWh/año}$$

La energía eléctrica que potencialmente puede lograrse mediante el aprovechamiento de metano generado por lodos residuales de la PTAR-NL es de $1\,132\,248 \text{ kWh/año}$. En el escenario uno, con proyecto de aprovechamiento, la energía potencialmente generada desplazaría energía eléctrica que actualmente es importada al sistema de tratamiento. Para estimar la cantidad de energía que aún sería necesario importar simplemente descontamos la energía que puede ser desplazada con un proyecto de aprovechamiento de la energía eléctrica utilizada en línea base, sin proyecto.

$$\text{Energía importada} = \text{energía requerida kWh/año} - \text{energía desplazada kWh/año}.$$

$$\text{Energía importada} = 8\,132\,356 \text{ kWh/año} - 1\,132\,248 \text{ kWh/año} = 7\,000\,108 \text{ kWh/año}.$$

Aunque sería necesario importar una parte importante de la energía requerida, la cantidad de energía desplazada es equivalente al 14% del uso de energía en la PTAR-NL. Para ponerlo en contexto, una opción de mejoras propuestas a partir de una auditoría de eficiencia energética realizada a la PTAR-NL en 2013 lograría un ahorro en energía en un rango de 8.98 a 9.49% (Watergy México A. C. & COCEF, 2014).

Tomando como base la cantidad de energía desplazada, se analiza el cambio en la eficiencia energética de la PTAR-NL, ahora con proyecto de recuperación de lodos. El escenario con proyecto se compone de energía eléctrica importada al sistema y energía eléctrica generada por biogás. Los factores de corrección son: para la energía eléctrica de 11.1 Kbtu/kWh, mientras que para la energía a partir de biogás el factor es 21.21 Kbtu/m³. Al aplicar estos parámetros a la nueva información obtenemos:

$$E_{as} = \sum E_u (F_S) = 7\,000\,108 \text{ kWh/año}, E_{\text{eléctrica}} (11.1 \text{ Kbtu/kWh}) + 419\,143 \text{ m}^3/\text{año} (21.2 \text{ Kbtu/m}^3) = 86\,587\,034 \text{ Kbtu/año}.$$

Con esta nueva composición en las fuentes de energía, se puede ahora estimar la eficiencia energética modificada por el aprovechamiento de lodos para la generación de energía eléctrica. El puntaje o *score* de la planta con su uso actual de energía $\ln(E_{as})$ se normaliza con el factor de ajuste estimado anteriormente ($F_{adj} = 1.05786$).

$$\ln(E_{as}) = \ln(86\,587\,034 \text{ Kbtu/año}) = 18.276$$

$$\ln(E_{adj}) = \ln(E_{as})/F_{adj} = 18.276/1.05786 = 17.27$$

Esta nueva estimación de eficiencia energética con proyecto genera un puntaje de 17.27, que es menor comparado con el 17.32 sin proyecto. Con este nuevo puntaje se modifica la ubicación del percentil de 87% en línea base, sin proyecto, al 89% con proyecto. Esto es, el aprovechamiento del potencial energético de los lodos residuales mejora la eficiencia de la PTAR-NL en un 2%. Aunque parece una mejora marginal en eficiencia, debe recordarse que la PTAR-NL, con su uso actual de energía, puede ser considerada como eficiente cuando se compara con la mayoría de plantas de características semejantes en Estados Unidos. En la sección siguiente se estima el beneficio en reducción de emisiones.

Reducción en las emisiones de metano

Para estimar la reducción potencial en las emisiones de metano se evaluó la generación de emisiones en línea de base, comparándola con las emisiones con recuperación de energía de los lodos como proyecto. Para lograr lo anterior, se utilizaron las ecuaciones (8) y (9) con los siguientes parámetros, tomados de Nolasco (2010).

$QL = 2\,629.34$ ton/año de lodos.

$DOC = 0.05$ para lodo doméstico.

MCF_S = factor de corrección de metano para la disposición de lodo (0.4) para planta de tratamiento aeróbica sobrecargada.

DOC_F = fracción de contenido orgánico (DOC), que se transforma en biogás (0.5).

F = fracción de metano en el biogás (0.7).

UF = factor de corrección por incertidumbre (0.94).

GWP_{CH_4} = potencial de calentamiento global del metano 21 kgCO₂/kgCH₄.

EF = factor de emisión de la red eléctrica (0.466 ton CO₂/MW).

L = fracción de biogás que se pierde = 0.2 recomendado.

Sustituyendo esos parámetros de la PTAR-NL en la ecuación (8) se obtiene que las emisiones en línea base (funcionamiento actual) de GEI de la PTAR-NL son de 4 136 toneladas equivalentes de dióxido de carbono al año.

$B_E = (2\,629.34 \text{ ton/año}) (0.05) (0.4) (0.5) (0.5) (16/12) (0.94) (21 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4) + (8\,132.36 \text{ MW/año}) (0.466 \text{ ton CO}_2\text{/MW}) = 4\,136 \text{ ton CO}_2\text{/año}.$

Este resultado no incluye las emisiones de GEI por transporte de los lodos. Sólo como referencia, según Chacón *et al.* (2010), las emisiones de GEI por transporte en Tamaulipas fueron de 3.32 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono y en 2015 serían de 3.92 millones de toneladas métricas.

La generación estimada de electricidad mediante recuperación de metano con la implementación de la propuesta (como se estimó anteriormente) es de 1 132 248 kWh/año. Utilizando ese dato en la ecuación (9) se estiman las emisiones de GEI con proyecto (P_E):

$$P_E = (2\,629.34 \text{ ton/año}) (0.05)(0.5)(0.7)(16/12) (0.2) - (1\,132.248 \text{ Mw/año} - 8\,132.356 \text{ Mw/año}) (0.466 \text{ ton CO}_2/\text{MW}) = 3271 \text{ ton CO}_2/\text{año}$$

$$ER = 4\,136 \text{ ton CO}_2/\text{año} - 3\,271 \text{ ton CO}_2/\text{año} = 865 \text{ ton CO}_2/\text{año}.$$

Esta disminución de 865 toneladas equivalentes de dióxido de carbono, en comparación con las emisiones estimadas en línea base, representan una reducción de 21%, sin comprometer la calidad del efluente de la PTAR-NL.

Conclusión

En este trabajo se muestra cómo la recuperación de lodos puede ser útil no sólo para desplazar energía eléctrica, con el consecuente ahorro económico, sino también para reducir las emisiones contaminantes de metano. El aprovechamiento de lodos para la generación de biogás en la PTAR-NL reduciría su volumen en materia orgánica hasta 50%, equivalente a una disminución total de materia seca de 25 a 33%. El biogás se aprovecharía para la generación de energía eléctrica, desplazando en 14% la importación de energía eléctrica. Este desplazamiento significaría un ahorro por la reducción en el consumo de energía eléctrica de la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Si se combina el ahorro en consumo con la aportación de energía por recuperación de metano, la PTAR-NL sería mucho más eficiente en términos energéticos. Además, el aprovechamiento de lodos mejoraría directamente en 2% la eficiencia actual en uso de energía de la planta, con la nueva composición de fuentes de energía (electricidad y biogás). Esta mejora en eficiencia es relevante debido a que la PTAR-NL, con su uso actual de energía, es considerada como eficiente, comparada con otras PTAR en México y Estados Unidos de características operativas similares. Los resultados obtenidos indican también que la

implementación de un proyecto de aprovechamiento de metano en la PTAR-NL reduciría en 21% las emisiones de GEI en toneladas equivalentes de dióxido de carbono, lo cual implica un beneficio ambiental relevante. Este ejercicio no contempla variables económicas, pero considerando los beneficios ambientales y energéticos que proporcionaría, es razonable pensar que puede ser económicamente viable.

Referencias

- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
- American Water Works Association, AWWA Research Foundation. (2007). *Energy index development for Benchmarking water and wastewater Utilities*. Recuperado de <http://www.waterrf.org/Pages/Projects.aspx?PID=3009>
- Bachmann, N., Jansen, J., Baxter, D., Bochmann, G., & Montpart, N. (2015). *Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants*. Recuperado de http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Wastewater_biogas_grey_web-1.pdf
- Blanco, J. P. (2014). *Aprovechamiento de lodos residuales para cerrar el ciclo urbano del agua, mejorar la eficiencia energética y reducir los GEI: caso de la PITAR Nuevo Laredo* (tesis de maestría). El Colegio de la Frontera Norte, Monterrey, México.
- Chacón, D., Giner, M. E., Vázquez, M., Roe, S. M., Maldonado, J. A., Lindquist, H., Strode, B., Anderson, R., Quiroz, C., & Schreiber, J. (2010). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Tamaulipas y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. Recuperado de http://www.cocef.org/uploads/files/inventario_emisiones_gei_tamaulipas_junio_2010.pdf
- Comisión Nacional del Agua, Conagua. (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTARIO%202011%20FINAL.pdf>

- Comisión Nacional del Agua, Conagua. (2014). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Inventario_Nacional_Plantas1.pdf
- Environmental Protection Agency, EPA. (2012). *Global anthropogenic Non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990-2030* (Report EPA 430R-12-006). Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-05/documents/epa_global_nonco2_projections_dec2012.pdf
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE. (2012). *Guía de usuario. Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. Temixco, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE. (2007). *Biomasa. Digestores anaerobios*. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
- Jorgensen, P. J. (2009). *Biogas, green energy. Process-Design-Energy supply-Environment*. Recuperado de <http://lemvigbiogas.com/BiogasPJJuk.pdf>
- Lazarova, V., Peregrina, C., & Pascal, D. (2012). Towards energy self-sufficiency of wastewater treatment. In: *Water. Energy interactions in water reuse* (pp. 87-126). Lazarova, V., Choo, K.-H., & Cornel, P. (eds.). London: IWA Publishing.
- Limón, J. G. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* Trabajo de ingreso del autor como miembro de la Academia de Ingeniería. Academia de Ingeniería, A. C., Guadalajara, México.
- 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 Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, R. (2014). *Wastewater engineering treatment and resource recovery* (5th ed.). London: McGraw Hill Higher Education.

- Monroy, O., Fama, G., Meraz, M., Montoya, L., & Macarie, H. (2000). Anaerobic digestion for wastewater treatment in México: State of the technology. *Water Resources*, 34(6), 1803-1816.
- Nolasco, D. A. (2010). *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales* (nota técnica). Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo, Sector de Infraestructura y Medio Ambiente.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Noyola, A., Paredes, M. G., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2016). Reduction of greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment in Mexico based on technology selection. *Clean Soil Air Water*, 44(9), 1091-1098. DOI: 10.1002/clen.201500084
- Peña de la, M. E., Ducci, J., & Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México* (Nota Técnica IDB-TN-521). Recuperado de <http://services.iadb.org/wmsfiles/products/Publications/37783778.pdf>
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, WWAP. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. *Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647S.pdf>
- Ramírez, E., Cardoso, L., & Moeller, G. (2009). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos activados. Material tecnodidáctico* (7ª ed.). Moeller, G. et al. (eds.). Jiutepec, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ríos, M., & Kaltschmitt, M. (2016). Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 384-395.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Semarnat-INECC. (2012). *México. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>

- Tabasová, A., Kropác, J., Kermes, V., Nemet, A., & Stehlík, P. (2012). Waste-to-energy technologies: Impact on environment. *Energy*, 44(1), 146-155.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. (2014). *Clean development mechanism CDM methodology booklet* (6th ed.). Recuperado de <https://cdm.unfccc.int/methodologies/>
- Watergy México, A. C., & Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, COCEF. (2014). *Auditoría de eficiencia energética en estaciones de bombeo y plantas potabilizadoras en el sistema municipal de agua y saneamiento de Nuevo Laredo, Tamaulipas. Informe Final*. México, DF: Watergy México A. C., Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, COCEF.
- Wiser, J. R., Schettler, J. W., & Willis, J. L. (December, 2010). *Evaluation of combined heat and power technologies for wastewater treatment facilities*. Recuperado de [https://www.cwwga.org/documentlibrary/121_EvaluationCHPTechnologiespreliminary\[1\].pdf](https://www.cwwga.org/documentlibrary/121_EvaluationCHPTechnologiespreliminary[1].pdf)