

# Ensayo de Investigación

## Desarrollo y prueba de un tanque agitado para la extracción de biogás atrapado en sedimentos del Río Lerma Development and testing of a stirred tank for biogas extraction trapped in sediments of the Lerma River

Edgar Oscar Serrano Núñez<sup>1</sup>, María del Carmen Carreño de León<sup>1</sup>, Félix Fernando de Hoyos Vázquez<sup>2</sup>, Marcos José Solache Ríos<sup>3</sup>, María del Consuelo Hernández Berriel<sup>1</sup>, Nicolás Flores Álamo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>TecNM – Instituto Tecnológico de Toluca

<sup>2</sup>TecNM – Instituto Tecnológico de Piedras Negras

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Autor de correspondencia:

nfloresa@toluca.tecnm.mx

Recibido:08-06-2023 Aceptado: 07-02-2024 (Artículo Arbitrado)

### Resumen

El Río Lerma pertenece a la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago, es uno de los sistemas hidrológicos más importantes de México, se divide en tres cauces: Alto, Medio y Bajo, el primero de ellos es donde nace el río y recibe las descargas de aguas residuales de diferentes industrias y municipios. El objetivo principal de este trabajo fue diseñar un sistema de extracción de biogás, y extraer metano del sedimento dragado del Curso Alto del Río Lerma (CARL), el biogás se genera por la degradación anaeróbica de la materia orgánica. El diseño del sistema de extracción de biogás se basó en la caracterización fisicoquímica de los sedimentos dragados. El muestreo se realizó en dos lugares con diferentes vertidos, los sedimentos mostraron una alta contaminación en términos de DQO (demanda química de oxígeno) con un valor de 1681 mg/L, lo que indica una alta cantidad de CH<sub>4</sub> producido en condiciones anaerobias. Se construyó un tanque de acero inoxidable con agitación y control de temperatura, se realizaron pruebas durante 240 minutos, con 12.8 kg de sedimento, y el volumen de biogás obtenido fue de 2.6 L y el porcentaje de CH<sub>4</sub> de 31.2 % (v/v) con una eficiencia de extracción de 16.98 %.

**Palabras clave:** Biogás, metano, digestión anaerobia, condiciones anaerobias, contaminación del agua.

### Abstract

The Lerma River belongs to the Lerma-Chapala-Santiago Basin, it is one of the most important hydrological systems in Mexico, and it is divided into three courses: Upper, Middle and Lower, the first of them is where the river is born and receives wastewater discharges from different industries and municipalities. The main objective of this work was to design a biogas extraction system, and to extract methane from the dredged sediment from the Upper Course of the Lerma River (UCLR), the biogas is generated by the anaerobic degradation of the organic matter. The design of the biogas extraction system was based on the physicochemical characterization of the dredged sediments. The sampling was performed in two places with different discharges, the sediments showed a high contamination in terms of COD (Chemical Oxygen Demand) with a value of 1681 mg/L, which indicates a high amount of CH<sub>4</sub> produced under anaerobic conditions. A stainless-steel tank with agitation and temperature control was built, tests were carried out for 240 minutes, with 12.8 kg of sediment, and the volume of biogas obtained was 2.6 L and CH<sub>4</sub> percentage of 31.2 % (v/v) with an extraction efficiency of 16.98 %.

**Keywords:** Programming, grades, pass rate, higher education, courses.

### Introducción

El Río Lerma tiene una longitud de 708 km dentro del territorio mexicano, convencionalmente se le ha dividido en cuencas (CCRL, 2015; Carreño, et al., 2018), de las cuales forma parte el Curso Alto del Río Lerma (CARL), en el cual la contaminación se ha incrementado con el crecimiento industrial desde la década de los sesenta, debido al aumento en las descargas de aguas residuales con altos niveles

de contaminantes orgánicos e inorgánicos, los cuales se acumulan en el fondo de la columna de agua del río y se adhieren a los sedimentos (De-Hoyos-Vázquez, et al., 2019; Ávila-Pérez, et al., 2011). El actual grado de contaminación del CARL demanda la implementación de tecnologías que mitiguen el deterioro ambiental causado por las descargas de aguas residuales.

La generación anaerobia y el uso del biogás como fuente de energía renovable es una opción energética limpia que contribuye a la mejora del medio ambiente (Ghodrat, et al., 2018; USEPA, 2004). El proceso anaerobio implica una serie de reacciones bioquímicas y se divide en cuatro etapas que ocurren secuencialmente: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Vavilin, et al., 2008; Cardenas-Medina, et al., 2020).

El objetivo de este trabajo fue construir un sistema de extracción de biogás y probar su funcionalidad usando sedimentos dragados de la CARL el cual ha sido producido por descomposición microbiana y se encuentra atrapado en los sedimentos, derivado de los procesos de descomposición natural de la biomasa en el Río Lerma. Los principales aspectos estudiados en esta investigación fueron, la cuantificación de metano en los sedimentos de dos de las principales descargas de la CARL por agitación y calentamiento. Para esto se determinó la demanda química de oxígeno (DQO), análisis orgánico elemental (CHONS) y se midió el pH.

## Metodología

Se seleccionaron dos puntos cercanos de descargas de aguas residuales para el muestreo (P1 y P2), donde ha sido reportada contaminación antropogénica importante en el Río Lerma (Carreño, et al., 2018) y que resultaron de fácil acceso. El Punto P1 se localiza sobre la carretera México-Toluca, en el Municipio de San Mateo Atenco, cuyas coordenadas son: 19°16'58.1"N 99°31'19.7"O, y que recibe las aguas residuales de las localidades de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Lerma. El Punto P2 se localiza sobre la carretera Toluca-Naucalpan en el municipio de Xonacatlán (coordenadas 19°22'38.6"N 99°33'18.3"O), en este sitio recibe aguas de zonas industriales paralelas al Río Lerma.

Las muestras se tomaron y trataron según el método 5667-12 (ISO, 2017). Las muestras se tomaron en la parte central del río utilizando una draga con extensiones que permitían un muestreo profundo. La draga metálica permitió tomar muestras de 1.5 kg de sedimentos, estas muestras fueron colocadas en botellas de polietileno y se almacenaron a 4°C antes de las pruebas de caracterización y extracción. Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron pH de acuerdo con la norma ISO 10390 (ISO, 2005), análisis

elemental (CHONS) utilizando el equipo Elemental Organic Analyzer Flash 2000 Thermo Scientific y demanda química de oxígeno (DQO) aplicando las normas PSEP (PSEP, 1996) y APHA (APHA, 2005).

Los datos de CHONS fueron considerados para estimar las cantidades de CH<sub>4</sub> en los sedimentos y los valores de DQO permitieron cuantificar el metano durante el proceso de extracción. El tamaño del tanque de agitación para la extracción de gas fue estimado considerando las cantidades de CH<sub>4</sub> obtenidas de la caracterización de los sedimentos utilizando la ecuación empírica presentada por Buswell y Boruff (1932) y del determinado a partir de pruebas de laboratorio y posteriormente con el uso de un tanque agitado. Para el cálculo de la eficiencia del proceso, los sedimentos dragados considerados como fuentes de materia orgánica digerida la cual produjo CH<sub>4</sub> que quedó atrapado y que puede ser liberado a la atmósfera durante los periodos de dragado de sedimentos del río, la cantidad de CH<sub>4</sub> calculada fue comparada con el CH<sub>4</sub> extraído experimentalmente en laboratorio. El proceso de extracción consistió en calentamiento y agitación constante de los sedimentos pensando en una aplicación simple.

## Pruebas de extracción de biogás en laboratorio

Se realizaron pruebas de extracción en botellas de polietileno a nivel laboratorio para determinar la concentración final de CH<sub>4</sub> (C<sub>f</sub>) que puede ser obtenido. El volumen de sedimento utilizado en cada reactor fue de 1 kg (volumen equivalente en una botella fue de 0.83 L) considerando aproximadamente el 90 % del volumen total del tanque (Wainaina, et al., 2019) y esperando obtener un 50 % de CH<sub>4</sub> (C<sub>CH<sub>4</sub></sub>), ya que este porcentaje se considera como la concentración más baja de biogás capaz de ser obtenida (Ghodrat et al., 2018). Las pruebas de extracción de CH<sub>4</sub> se realizaron por triplicado, utilizando botellas de polietileno con válvula de salida, se colocaron en una cuba de calentamiento Thermo Scientific modelo HP88857100. El proceso comenzó a temperatura ambiente (18 °C) y se aumentó 1 °C cada 7.5 minutos hasta 50 °C, con una duración total de 240 minutos. El biogás producido fue extraído y contenido en un matraz Erlenmeyer previamente acondicionado para evitar fugas y para medir la presión con un manómetro diferencial modelo PYLE PDMM01. Posteriormente se determinó la concentración de gas por Cromatografía, de gases

con un cromatógrafo Agilent 7890B, utilizando jeringa de 5 mL y un filtro de 340 nm, para evitar la humedad en la muestra gaseosa contenida en el matraz. Previamente realizó una curva de calibración para el cálculo de concentración del gas (% v/v).

### Desarrollo del sistema de extracción de biogás

En función de la concentración de  $\text{CH}_4$  obtenida ( $C_p$ ), se determinaron las dimensiones del reactor, de acuerdo a lo sugerido por Ghodrat et al., (2018), que para diseñar el tanque de gas considera que la concentración de  $\text{CH}_4$  en el biogás producido oscila entre 50 y 75 % v/v a partir de un incremento de temperatura de forma gradual hasta 50 °C, la densidad y la capacidad calorífica a presión constante de la mezcla de sedimentos permanecen constantes y no se espera ningún cambio de fase (evaporación, condensación). El tanque propuesto (ver Figura 1) cuenta con un termostato y se adapta para operar en lotes, el volumen del tanque ( $V_L$ ) considerando que opere al 90 % de la capacidad se puede determinar utilizando la ecuación (1).

$$V_L = \left( \frac{V_s}{C_f} \right) C_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

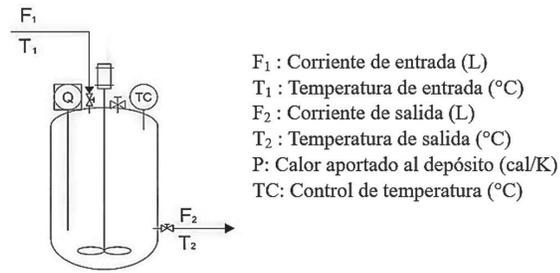
donde  $V_s$  volumen de sedimento utilizado (0.83 L),  $C_f$  concentración de  $\text{CH}_4$  obtenida experimentalmente,  $C_{\text{CH}_4}$  concentración esperada del 50 % v/v.

El diámetro y la altura del tanque se calcularon tomando los criterios matemáticos básicos de máximos y mínimos mediante la primera y segunda derivada con base en el volumen requerido del tanque ( $V_L$ ), con el fin de minimizar el material necesario y reducir el costo de fabricación. El material utilizado para su construcción fue acero inoxidable Cr-Mn, resistente a la corrosión y cuya resistencia mecánica es de 65 kg/m<sup>2</sup> relacionada con el grosor de la pared del tanque.

### Volumen de biogás generado y concentraciones

El biogás contenido en los intersticios de los sedimentos producido por la acción de los microorganismos anaerobios en la materia orgánica dentro y fuera de los sedimentos puede liberarse si el material se somete a agitación y calentamiento continuos y almacenarse para su posterior análisis (De-Hoyos-Vázquez et al., 2019).

Las cantidades empíricas de metano en las muestras de sedimento pueden calcularse utilizando la ley



**Figura 1.** Tanque de calentamiento para la extracción de biogás.  
Fuente: Elaboración propia.

de los gases ideales, considerando el volumen de gas ocupado por un mol de  $\text{CH}_4$  a una temperatura determinada, como se muestra en la ecuación (2).

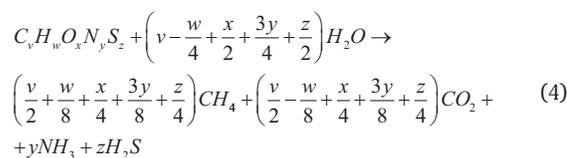
$$V = \frac{nRT}{P} \quad (2)$$

donde  $V$  es el volumen de  $\text{CH}_4$  en L,  $n$  es el número de moles de gas,  $R$  es la constante universal de los gases 0.082057 atm L/mol K,  $T$  la temperatura en Kelvin y  $P$  la presión absoluta en atm.

El volumen empírico ocupado por un mol de  $\text{CH}_4$  a 35 °C y 1 atm de presión resulta de 25.29 L. La cantidad de biogás extraído por acción mecánica y calentamiento ( $V_{EM}$ ) se calculó a partir de la concentración de  $\text{CH}_4$  generada por la degradación anaerobia de la materia orgánica de los sedimentos considerando como base de cálculo la DQO, la cual está relacionada con la producción de biogás, ya que el rendimiento está estrechamente relacionado con el grado de biodegradabilidad de un sustrato (Buswell y Boruff, 1932), la masa de la DQO de un mol de  $\text{CH}_4$  puede considerarse igual a 64 g ( $m_{DQO}$ ), por lo que la cantidad de  $\text{CH}_4$  producida por unidad de DQO a 35 °C se calculó utilizando la ecuación (3), obteniéndose 0.4 L  $\text{CH}_4$ /g DQO.

$$\frac{V}{m_{DQO}} = V_{EM} \quad (3)$$

Si se conoce la composición del lodo sin tener en cuenta el crecimiento de microorganismos, puede utilizarse la relación propuesta por primera vez por Buswell y Boruff (1932) y ampliada por Sykes (2001) para estimar la cantidad de metano ( $\text{CH}_4$ ) que se produciría en condiciones anaerobias. Los valores de  $v$ ,  $w$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  en la ecuación (4) representan los porcentajes de CHONS, respectivamente.



El volumen total de CH<sub>4</sub> extraído y las concentraciones de CH<sub>4</sub> en el biogás se compararon con el valor estimado mediante la ecuación (5) (fracción molar de CH<sub>4</sub>) para determinar la eficiencia de extracción del biogás y del CH<sub>4</sub>.

$$f_{CH_4} = \frac{4v + w - 2x - 5y - 2z}{8(v - y + z)} \quad (5)$$

### Pruebas de extracción en el tanque agitado

Una vez armado el tanque de extracción de gases, se realizaron pruebas de fugas utilizando aire a 1 atm de presión. Para los experimentos de extracción de biogás con el tanque se colocó 12.8 kg de sedimentos (equivalentes a 13.21 L de volumen ocupado). La agitación se realizó utilizando un motor acondicionado con un variador de frecuencia que permitió operar a 100 rpm. El gas producido fue muestreado y llevado a análisis por cromatografía de gases.

## Resultados y discusión

### Caracterización fisicoquímica del sedimento

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los sedimentos dragados se muestran en la Tabla 1. La muestra obtenida en el punto P1 tuvo una concentración mayor de DQO que el punto P2, estos sedimentos pueden contener una gran cantidad de metano atrapado o ser generadores de la producción de metano.

El porcentaje de nitrógeno obtenido fue mayor que el del carbono, por lo que el proceso microbiano parece no ser estable ya que hubo un déficit de carbono en los lodos (quizás debido a la degradación continua), y entonces el proceso de degradación resultó lento considerando que el nitrógeno en exceso actúa de inhibidor (Bodelier y Laanbroek, 2004; Lesteur, et al., 2010). El hidrógeno puede actuar como precursor de la producción de CH<sub>4</sub> en el proceso de metanogénesis y contribuir a una mayor producción de CH<sub>4</sub> en el biogás (Hernández-Berriel et al., 2014).

La DQO fue analizada antes y después de las pruebas de extracción a escala de laboratorio para identificar si hubo algún cambio durante el proceso, lo que podría indicar una descomposición de la materia orgánica durante el experimento de extracción

mecánica posterior. La DQO no mostró ninguna diferencia, esto indica que no hubo ninguna degradación anaeróbica durante la extracción de gas, estos resultados son similares a los presentados por Altamirano (2017), quien trabajó con sedimentos dragados de diferentes lugares del CARL al medir el potencial bioquímico metanogénico, siendo el pH de 7.6, una DQO de 1250 mg/L, 0.58 % de C, 1.58 % de H, 0.66 % de O y 0.09 % de S.

### Extracción de biogás a escala laboratorio

Se midió el volumen de biogás extraído, así como la presión en el interior de los matraces donde la presión máxima fue de 55.6 mmHg en un periodo de 240 minutos. Una vez extraído el gas, se tomó una muestra de 0.01 L para su análisis por cromatografía, la concentración (% v/v) y el volumen (L) de metano extraído se muestran en la Tabla 2.

Los sedimentos obtenidos de P1 produjeron un mayor volumen de gas extraído (CH<sub>4</sub>) que los sedimentos de P2. De Hoyos et al., (2019) presentaron un estudio sobre la extracción y generación de biogás de sedimentos dragados mediante actividad metanogénica específica (AME), el CH<sub>4</sub> reportado fue de un 15 %, similar a los resultados presentados en este trabajo como se puede ver en la Tabla 2.

### Estimación de la producción de gas a escala laboratorio

La fracción molar de CH<sub>4</sub> (f<sub>CH<sub>4</sub></sub>) se calculó utilizando la ecuación (5), para P1 resultó de 0.6394 y para P2 fue 0.64. Metcalf y Eddy, (2004), sugieren que se puede esperar una composición de CH<sub>4</sub> superior al 50 % en condiciones anaeróbicas en biorreactores.

El volumen de biogás se calculó utilizando el valor calculado con la ecuación (3) y los datos de DQO presentados en la Tabla 1, la DQO se convierte en CH<sub>4</sub> a través del proceso de degradación metanogénica, ya que el sedimento dragado de la CARL es una fuente de materia orgánica capaz de ser digerida por microorganismos anaerobios que es la condición común en el fondo del río. El volumen de CH<sub>4</sub> por litro de sedimento para el P1 resultó de 0.6728 L, mientras que para P2 el volumen de metano producido fue de 0.4512 L. Para la operación del tanque de extracción por agitación y calentamiento se asumió que no se produce digestión anaerobia ni crecimiento microbiano durante el tiempo de extracción ya que esta consiste únicamente en extraer el gas atrapado en los intersticios que conforman los sedimentos.

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica del sedimento dragado.

Muestra	pH	TVS (g/L)	TS (g/L)	DQO <sub>Inicial</sub> (mg/L)	DQO <sub>Final</sub> (mg/L)	% C	% H	% O	% N	% S
P1	7.71	22.02	560.10	1682	1681	0.55	1.64	0.71	10.16	0.11
P2	7.28	16.21	100.15	1128	1125	0.24	0.85	0.69	10.17	0.06

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.** Concentraciones medias y volúmenes de CH<sub>4</sub>.

Punto	CH <sub>4</sub> (% v/v)	CH <sub>4</sub> producido (L)
1	15.79	0.0038
	15.85	0.0036
	14.87	0.0037
2	14.04	0.0017
	13.91	0.0015
	13.87	0.0017

Fuente: Elaboración propia.

### Dimensiones y pruebas de extracción de biogás con el tanque agitado

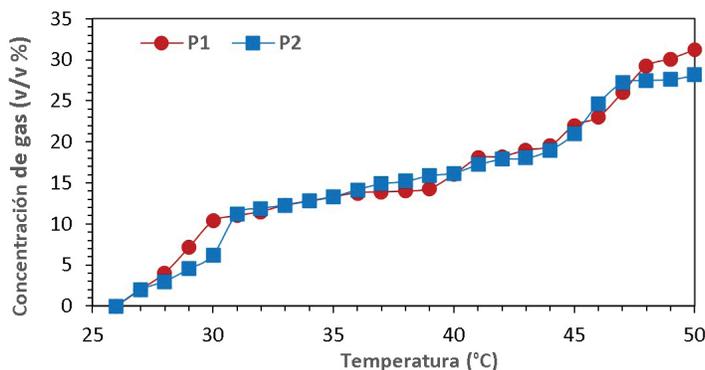
El tanque anaerobio se dimensionó utilizando la ecuación (1) y la concentración media de CH<sub>4</sub> de los puntos P1 y P2, resultando un volumen del tanque al 50 % de su capacidad de 13.21 L y de 14.57 L al 100 % de su capacidad. A partir de esto se asumió un volumen total de 15 L. Mediante el criterio de primera derivada (máximos y mínimos) se determinó el diámetro (D) y la altura (h) del tanque, siendo estas de 26.7 cm y 30.7 cm respectivamente. El material de tanque fue acero inoxidable Cr-Mn, con un espesor de 0.5 cm. El tanque fue acondicionado (ver Figura 2) con un motor eléctrico de ¼ hp marca WEG colocado sobre un soporte para mover un agitador de paletas, válvula de muestreo y purga de sedimentos de ½ pulgada, válvula de ¼ de pulgada y válvula reductora para toma de muestras y salida de biogás, resistencia calefactora a 120 V, 60 Hz, 1000 W, termostato digital programable marca Bayite 1100 W, 110 V (rango de temperatura de -58 ~ 110 °C), la unión de la cabeza y cuerpo del tanque se realizó mediante juntas de neopreno para evitar fugas.



**Figura 2.** Sistema de extracción de biogás con agitación y control de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

De las pruebas de extracción de biogás se generó un perfil de concentración para cada muestra como se muestra en la Figura 3, la rapidez de extracción estuvo en función del incremento de temperatura, dentro del intervalo de 24 a 30 °C se determinó una rapidez promedio de 1.15 % por cada grado de incremento de temperatura, mientras que en el intervalo de 30 a 45 °C la rapidez promedio fue de 0.33, posiblemente debido a que en este intervalo disperso más el calor suministrado y finalmente se obtuvo un rapidez promedio de 1.23 en el intervalo de 45 a 50 °C. La concentración más alta de CH<sub>4</sub> fue de 31.2 % v/v para el punto P1 mientras que para el P2 la concentración fue del 28.1 % v/v.



**Figura 3.** Producción de CH<sub>4</sub> en función de la temperatura de extracción.

Fuente: Elaboración propia.

Rahman et al., (2018) y Altamirano (2017), reportaron una producción de CH<sub>4</sub> en torno al 30 % en un periodo de 10 a 15 días con 20 y 30 L por digestión anaerobia. La Figura 3 muestra una concentración superior al 30 % de CH<sub>4</sub> en 240 minutos con un volumen 10 veces menor. Por otro lado, Horan et al., (2018), trabajaron con un residuo orgánico y lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales sometidos a digestión anaerobia durante un periodo de 30 días, una producción máxima de biogás fue de 4.46 L con una concentración de CH<sub>4</sub> del 30 %.

Según Abram et al., (2011), Galván-Arzola et al., (2022) y Bolong et al., (2018) el CH<sub>4</sub> que se produce por degradación anaerobia requiere una temperatura en un rango mesofílico (30 a 35 °C), las bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas crecen en el medio con un conjunto de nutrientes y materia orgánica que se encuentran en los sedimentos del CARL, entonces, el proceso de metanogénesis se lleva a cabo eficientemente en el fondo de la columna de agua del río. Parte del CH<sub>4</sub> producido es liberado a la atmósfera y parte es retenido por los sedimentos y la materia orgánica del CARL.

### Eficiencia del proceso de extracción

El volumen de CH<sub>4</sub> esperado se calculó para un volumen de 13.21 L de sedimento y usando la ecuación (3), también utilizada por Lozada y Pérez (2010), quienes sugieren que para el cálculo se asuma una producción del 50 % de CH<sub>4</sub> para poder utilizarlo como fuente de energía, mientras que para el volumen experimental se usó un volumen de 3.6 L, cuyos perfiles de concentración se presentaron en la Figura 3. El porcentaje de eficiencia en la extracción para los puntos muestreados se presenta en la Tabla 3.

Se observó una mayor eficiencia con los sedimentos del punto P2. Hay que tener en cuenta que en el momento de tomar las muestras de sedimentos de la CARL, la materia orgánica contenida ya está en proceso de digestión anaerobia, por lo que parte del CH<sub>4</sub> se libera a la atmósfera y, en consecuencia sólo se puede recuperar una fracción del CH<sub>4</sub>.

La concentración de CH<sub>4</sub> se calculó de la misma manera que el cálculo para la eficiencia del volumen de gas extraído, es decir se colocaron las concentraciones en lugar de los volúmenes experimentales y calculados. Las concentraciones estimadas de CH<sub>4</sub> son similares, sólo se utilizó en el cálculo la concentración de CH<sub>4</sub> de P2 (64 %). Se obtuvo una eficiencia del 48.75 %, equivalente al porcentaje de CH<sub>4</sub>, que se encontró en el sedimento, por lo tanto, al menos el 15.25 % del CH<sub>4</sub> se libera a la atmósfera. Según Bodelier y Laanbroek (2004), las fuentes de CH<sub>4</sub> atmosférico son principalmente de origen biológico (70-80 %) y los humedales y ríos contaminados se consideran fuentes importantes de este gas, y contribuyen con el 40-55 % de las emisiones anuales globales, por lo tanto, sobre las condiciones ambientales y las descargas de aguas residuales en los cuerpos de agua.

El volumen calculado y las concentraciones de CH<sub>4</sub> son similares a los experimentales si la digestión anaerobia se lleva a cabo con una muestra orgánica recién extraída. Debido a la existencia de microorganismos anaerobios en los sedimentos del fondo del río, cabe suponer que la materia orgánica presente en los sedimentos ha sido parcialmente digerida, por lo que el volumen de gas y la concentración de los componentes pueden ser diferentes de los valores calculados empíricamente.

### Conclusiones

El equipo diseñado resultó sencillo y eficiente para la extracción del biogás. Es posible obtener biogás generado por los procesos naturales de degradación de la materia orgánica de la CARL, atrapado en el sedimento del fondo del Río. Los resultados indican que, en condiciones de temperatura ambiente y anaeróbicas se logra obtener 0.6728 L de CH<sub>4</sub> por cada litro de sedimento para el P1 y 0.4512 L para el P2, lo cual muestra un potencial aceptable del sedimento dragado del Río Lerma como fuente para extracción de biogás por un método mecánico con calentamiento.

**Tabla 3.** Eficiencia del tanque de extracción.

Punto de muestra	DQO (mg/L)	V esperado (L)	V experimental (L)	% Eficiencia
P1	1682	8.881	1.1232	12.64
P2	1128	5.956	1.0116	16.98

Fuente: Elaboración propia.

Los sedimentos dragados de P1 presentaron mayores cantidades de biogás y concentración de CH<sub>4</sub> que el P2, quizá debido al contenido de materia orgánica característico de las descargas en cada zona. El CH<sub>4</sub> obtenido con la metodología descrita en esta investigación puede ser utilizado principalmente en la generación de energía para calefacción.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca otorgada para estudios de doctorado a Edgar Oscar Serrano-Núñez (CVU:79072), desarrollados en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca.

## Referencias

- Altamirano, A. (2017). *Producción de biometano a partir de sedimentos arrastrados en el Curso Alto del Río Lerma, Estado de México*. [Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4051>
- Abram, F., Enright, A. M., O'reilly, J., Botting, C. H., Collins, G., & O'flaherty, V. (2011). A metaproteomic approach gives functional insights into anaerobic digestion. *Journal of Applied Microbiology*, 110(6), 1550-1560.
- Apha Awwa, W. E. F. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation*.
- Bolong, N., Asri, H.A., Ismail, N.M, & Saad, I. (2018) Effect of Seaweed Physical Condition for Biogas Production in an Anaerobic Digester. In: Horan N., Yaser A., Wid N. (eds) Anaerobic Digestion Processes. *Green Energy and Technology*. Springer, Singapore.
- Bodelier, P.L., & Laanbroek, H.J. (2004) Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 47, 265-277.
- Buswell, A. W., & C. B. Boruff (1932) The Relationship Between Chemical Composition of Organic Matter and the Quality and Quantity of Gas Production During Digestion, *Sewage Works Journal*, 4(3), p. 454.
- Cárdenas-Medina, K. N., Fajardo-Ortiz, M. C., Schettino-Bermúdez, B. S., Meraz-Rodríguez, M. A., & Castilla-Hernández, P. (2020). Acidogenesis/methanogenesis from acid cheese whey in hybrid-UASB reactors. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19 (Sup. 1), 17-27.
- Carreño, C., Zarazúa, G., Fall, C., Ávila, P. & Tejeda, S. (2018) Evaluación de la toxicidad de los sedimentos del curso alto del río Lerma. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34 (1), 117-126.
- Comisión de la Cuenca del Río Lerma (2015). Diagnóstico de la Cuenca del Río Lerma. Publicado por la Comisión de la Cuenca del Río Lerma (CCRL).
- De-Hoyos-Vázquez, F.F., Carreño-de-León, M.C, Serrano-Núñez, E.O., Flores-Alamo, N., & Solache-Ríos, M.J. (2019) Development of a novel non-dispersive infrared multi sensor for measurement of gases in sediments. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 288:486-492.
- Galván-Arzola, U., Miramontes-Martínez, L. R., Escamilla-Alvarado, C., Botello-Álvarez, J. E., Alcalá-Rodríguez, M. M., Valencia-Vázquez, R., & Rivas-García, P. (2022). Anaerobic digestion of agro-industrial waste: Anaerobic lagoons in Latin America. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(2), IA2680-IA2680.
- Ghodrat, G.A., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., & Mussatto, S.I. (2018) Waste Management Strategies; the State of the Art. Biogas: Fundamentals, Process, and Operation. In: Tabatabaei M., Ghanavati H. (eds) *Biofuel and Biorefinery Technologies Book*, Vol. 6, Springer.
- Horan, N., Yaser, A.Z., & Wid, N. (2018) Anaerobic Digestion of Screenings for Biogas Recovery. *Anaerobic Digestion Processes: Applications and Effluent Treatment (Green Energy and Technology)* Springer:85–103.
- Hernández-Berriel, M.C., Mañón-Salas, M.C, Buenrostro-Delgado, O., Sánchez-Yañez, J., & Márquez-Benavides, L. (2014) Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production. *Environmental Engineering and Management Journal*. 13(10), 2687-2695.
- ISO 5667-12:2017. (2017) Water quality. Sampling. Guidance on sampling of bottom sediments from rivers, lakes and estuarine areas.
- ISO 10390: 2005. (2005). Soil Quality–Determination of pH. International Organization for Standardization.
- Lesteur, M., Bellon, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J., Junqua, G., & Steyer, J. (2010) Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*. 431-440.
- Lozada, P. T., & Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 5-14.
- Metcalf, E., & Eddy, H. (2004) Anaerobic Suspended and Attached Growth Biological Treatment Processes. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Mc Graw Hill, Nueva York, pp. 984-993
- PSEP. Programa de Educación sobre Seguridad de los Plaguicidas (1996). Recommended Guidelines for measuring selected environmental variables in Puget Sound. Preparado para U.S. Environmental Protection Agency Region 10, Office of Puget Sound, Seattle, WA y Puget Sound Water Quality Authority, Olympia, WA.
- Rahman, M.M., Lee, Y.S., Tamiri, F.M., & Hong, M.G.J. (2018) Anaerobic Digestion of Food Waste. *Green Energy and Technol.*
- USEPA. United States Environmental Protection Agency (2004) The Incidence and Severity of Sediment Contamination in Surface Waters of the United States, National Sediment Quality Survey: Second Edition. Washington, D.C.
- Vavilin, V., Fernández, B., Palatsi, J., & Flotats, X. (2008) Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*.
- Sykes, R.M. (2001) *Reviewers comments and additions*.
- Wainaina, S., Lukitawesa, N., Kumar-Awasthi, M., & Taherzadeh, M. J. (2019). Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: a critical review. *Bioengineered*. 10(1), 437-458.