

ELIMINACIÓN DE METIL SILOXANOS VOLÁTILES DEL BIOGÁS: UN NUEVO ENFOQUE BIOTECNOLÓGICO

LAURA RIVERA, JAIME PÉREZ,
GLORIA MORENO Y GUILLERMO QUIJANO

Resumen

Los metil siloxanos volátiles (MSV) son contaminantes del biogás que hasta hace poco tiempo se pensaba que estaban presentes principalmente en biogás de relleno sanitario. Sin embargo, actualmente, se sabe que su ocurrencia es mucho más frecuente en diversos tipos de biogás. Las tecnologías comerciales de remoción de MSV son de tipo fisicoquímico, destacando los sistemas de adsorción regenerativa, los cuales presentan altos costos de inversión y operación, limitando su implementación en pequeñas y medianas instalaciones que producen biogás. En este trabajo se presenta una plataforma biotecnológica innovadora de remoción de MSV. El sistema multifásico desarrollado permite superar las limitaciones por transferencia de masa reportadas en biorreactores convencionales, incrementando la solubilidad de los MSV y su posterior degradación biológica.

UNIDAD ACADÉMICA JURQUILLA

El agotamiento gradual de los combustibles fósiles y la aceleración del cambio climático han intensificado la búsqueda de nuevas fuentes de energía limpia y sostenible. De entre toda una gama de opciones, la generación de energía renovable a partir de biocombustibles gaseosos constituye una alternativa con un gran potencial a nivel mundial. El biogás, constituido principalmente por metano (CH_4 , 50-60%) y dióxido de carbono (CO_2 , 40-50%), es el biocombustible gaseoso que más aplicación tiene a escala industrial en la actualidad [1,2]. Este biocombustible puede producirse a partir de materia orgánica contenida en residuos sólidos municipales, aguas residuales domésticas e industriales, así como una variedad de residuos agroindustriales por medio de un proceso conocido como *digestión anaerobia*, el cual se aplica a gran escala en todo el mundo [1].

Contaminantes del biogás

Dependiendo de las características y composición de la materia orgánica utilizada, el biogás resultante tendrá contaminantes

que deben removerse para ser aprovechado energéticamente. El sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3), compuestos orgánicos volátiles (COV) y los metil siloxanos volátiles (MSV) se encuentran entre los contaminantes más comunes del biogás. La aplicación masiva del biogás en motores/turbinas de ciclo combinado para la generación de energía térmica y eléctrica renovable ha sido limitada por los altos costos asociados a su purificación. Mientras que ya existen tecnologías exitosas para la remoción de H_2S , NH_3 y COV, los MSV son contaminantes poco conocidos y sólo están disponibles a nivel comercial tecnologías fisicoquímicas para su eliminación. Los sistemas de adsorción regenerativa constituyen actualmente la tecnología más empleada para la remoción de MSV del biogás, los cuales presentan elevados costos de inversión y operación, así como una alta huella de carbono debido al uso intensivo de energía [3]. Esto ha limitado el aprovechamiento del biogás producido en pequeñas y medianas instalaciones que no son capaces de implementar los costosos sistemas de purificación disponibles.

Los MSV son una familia de contaminantes del biogás que contienen enlaces Si-O y Si-CH₃. Al quemarse, los MSV generan películas de silicato (SiO_2), ocasionando problemas graves de abrasión y lubricación en sistemas de aprovechamiento energético (Figura 1). Los MSV se originan por la descomposición

del polidimetilsiloxano, mejor conocido como *aceite o grasa de silicón*, el cual es un lubricante de amplio uso a nivel industrial, además, es un componente común en productos de cuidado personal como cremas, jabones, champús, acondicionadores y maquillajes.

La Tabla 1 presenta a los MSV más comunes en el biogás, su fórmula y estructura química. En su nomenclatura abreviada, las letras L y D indican MSV lineales y cíclicos, respectivamente, mientras que los números 1-6 indican los átomos de silicio en la molécula. La concentración total de MSV en el biogás puede llegar a los 400 mg m^{-3} , mientras que los sistemas de aprovechamiento energético como los motores de ciclo combinado permiten una concentración máxima de entre 0.03 y 28 mg m^{-3} [4]. Inicialmente, se pensaba que los MSV eran contaminantes relevantes en el biogás proveniente de rellenos sanitarios. Sin embargo, mediciones hechas por nuestro grupo de investigación revelaron que la presencia de MSV es habitual en biogás generado a partir de lodos de purga de plantas de tratamiento de aguas residuales. A medida que se ha incrementado la monitorización de los MSV, se ha confirmado su presencia en diversos tipos de biogás. Por tanto, el desarrollo de procesos de remoción de MSV eficientes, robustos y con menores costos que las tecnologías fisicoquímicas es un tema de gran relevancia en todo el mundo.

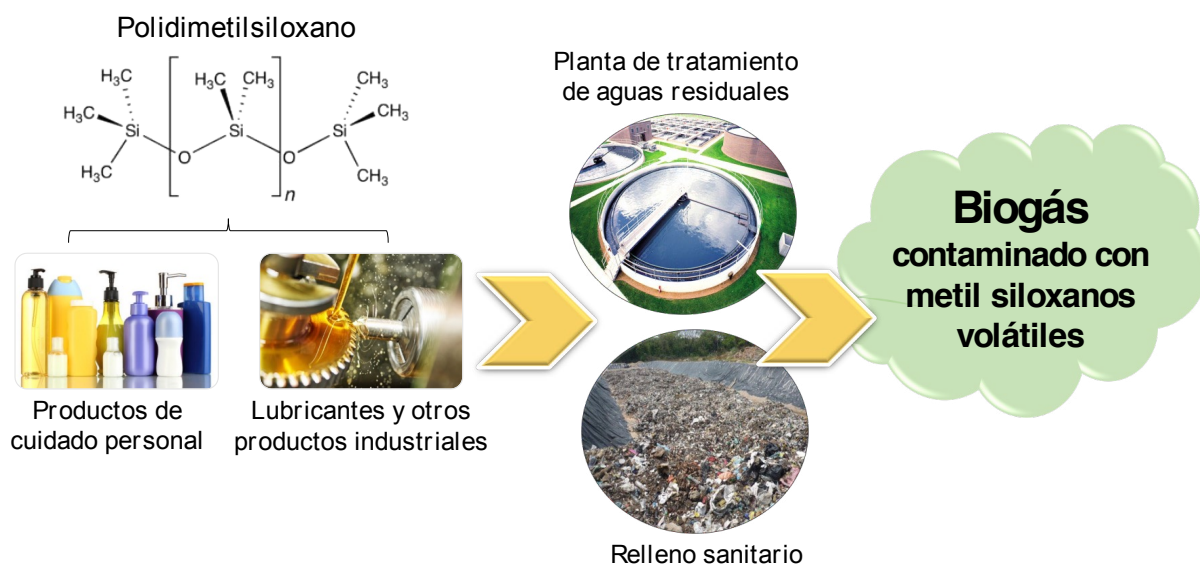


Figura 1. Origen de los metil siloxanos volátiles en diversos tipos de biogás

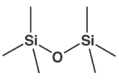
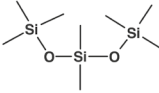
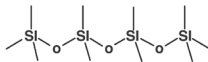
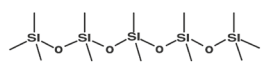
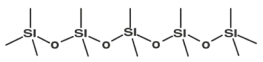
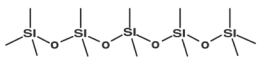
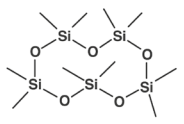
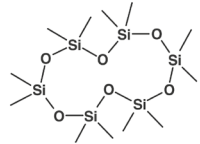
| MSV lineales | Hexametildisiloxano | Octametiltrisiloxano | Decametiltetrasiloxano | Dodecamilpentasiloxano |
|--------------|---|---|--|---|
| Abreviatura | L2 | L3 | L4 | L5 |
| Fórmula | $C_6H_{18}OSi_2$ | $C_8H_{24}O_2Si_3$ | $C_{10}H_{30}O_3Si_4$ | $C_{12}H_{36}O_4Si_5$ |
| Estructura |  |  |  |  |
| MVS cíclicos | Hexametilciclotrisiloxano | Octametilciclotetrasiloxano | Decametilciclopentasiloxano | Dodecametilciclohexasiloxano |
| Abreviatura | D3 | D4 | D5 | C12H36O6Si6 |
| Fórmula | $C_6H_{18}O_3Si_3$ | $C_8H_{24}O_4Si_4$ | $C_{10}H_{30}O_5Si_5$ | $C_{12}H_{36}O_6Si_6$ |
| Estructura |  |  |  |  |

Tabla 1. Metil siloxanos volátiles identificados en diversos tipos de biogás

Biorreactores multifásicos para la eliminación de MSV

En términos generales, los sistemas biológicos convencionales presentan baja eficiencia de remoción de MSV. Esto se debe a que los MSV son moléculas hidrofóbicas con una baja solubilidad en agua. Por ejemplo, el D4 y el D5 (dos de los MSV más abundantes en el biogás) tienen constantes de Henry adimensionales de 3.1 y 1.4, respectivamente, a 1 atm y 30°C [5]. Esto resulta en una pobre transferencia de MSV del biogás a fases acuosas donde residen los microorganismos capaces de degradarlos. Las eficiencias de remoción de MSV en sistemas biológicos se encuentran en el orden de 10-40% [6]. Una de las principales motivaciones para el desarrollo de biotecnologías de tratamiento de MSV es que éstas pueden ser operadas a presión y temperatura ambiente, lo que disminuye drásticamente sus costos de operación en comparación con tecnologías fisicoquímicas. Por tanto, las limitaciones de transferencia de masa deben superarse para desarrollar tecnologías biológicas que sean competitivas con sus contrapartes fisicoquímicas.

Nuestro grupo de investigación desarrolla una estrategia innovadora para mejorar la transferencia de masa de MSV en sistemas biológicos, la cual consiste en añadir una fase orgánica inmiscible en agua, biocompatible y no biodegradable bajo las condiciones de operación con alta afinidad por los MSV. Como se muestra en la Figura 2, en sistemas multifásicos

gas/aceite/agua, la alta solubilidad de los MSV en el aceite genera una ruta de transferencia de MSV adicional, mejorando de manera muy importante la transferencia y posterior degradación biológica de los contaminantes.

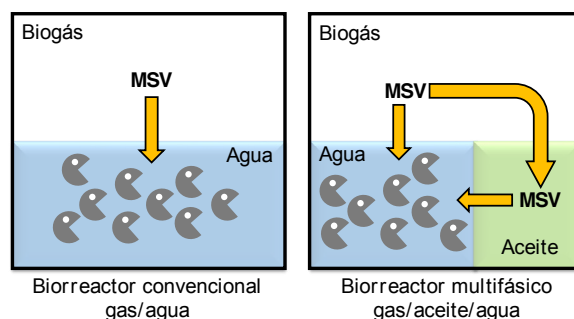


Figura 2. Mecanismos de transferencia de MSV en biorreactores convencionales y en sistemas multifásicos propuestos por nuestro grupo de trabajo donde se incluye una fase orgánica con alta afinidad por los MSV

Determinaciones experimentales llevadas a cabo en la Unidad Académica Juriquilla del Instituto de Ingeniería han demostrado que la solubilidad de MSV en algunas fases

orgánicas es entre 90 y 3,700 veces mayor que en agua, dependiendo del tipo específico de metil siloxano. La mejora en la transferencia de masa debida a la adición del aceite es proporcional al porcentaje utilizado en el biorreactor. Al tener mayor viscosidad que el agua, la fase orgánica se agrega en porcentajes no mayores a 10% con respecto al volumen total del biorreactor para evitar incrementos importantes en los costos de mezclado del sistema [3]. Los resultados obtenidos hasta el momento confirman el gran potencial de los sistemas multifásicos para remover de forma robusta y eficiente los MSV del biogás. La Figura 3 presenta un prototipo totalmente instrumentado y controlado que fue desarrollado por nuestro grupo de trabajo para llevar a cabo la purificación de biogás.

Conclusiones

Este trabajo presenta una alternativa de base biotecnológica para la remoción de MSV con el fin de habilitar al biogás para su aprovechamiento energético. Al ser operados a presión y temperatura ambiente, las tecnologías biológicas pueden implementarse a una fracción del costo de las tecnologías fisicoquímicas disponibles. Por tanto, los resultados obtenidos en este proyecto tienen un gran impacto en el escenario global actual que demanda energéticos sustentables. Las características de los sistemas biológicos de tratamiento de MSV los hacen idóneos para su implementación en pequeñas y grandes instalaciones de tratamiento de residuos que generan biogás, tales como plantas de tratamiento de aguas residuales y rellenos sanitarios.

Agradecimientos

Este trabajo es apoyado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (proyecto PAPIIT TA100121) y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Proyecto Ciencia Básica A1-S-10079). Se agradece el apoyo técnico proporcionado por Ángel A. Hernández. |

Referencias

- [1] Bond T. y Templeton M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development* 15:347-354.
- [2] Moreno-Andrade, I.; Moreno G. y Quijano G (2020). Theoretical framework for the estimation of H₂S concentration in biogas produced from complex sulfur-rich effluents. *Environmental Science and Pollution Research* 27:15959-15966.
- [3] Quijano G.; Miguel-Romera, J. A.; Bonilla-Morte, L. M. y Figueroa-González I. (2017). Two-phase partitioning bioreactors for treatment of volatile hydrocarbons. En: *Biodegradation and bioconversion of hydrocarbons*. Heimann K, Karthikeyan OP, Muthu SS (Eds). Springer, pp. 225-258. ISBN 978-981-10-0199-4.
- [4] Gabriel, D. y Sierra H. (2017). Purification and uses of biogas. *Universitat Autonoma de Barcelona*. ISBN 978-84-490-6962-8.
- [5] Zhang Y.; Oshita K.; Kusakabe T.; Takaoka, M.; Kawasaki Y.; Minami D. y Tanaka T. (2020). Simultaneous removal of siloxanes and H₂S from biogas using an aerobic biotrickling filter. *Journal of Hazardous Materials* 391: 122187.
- [6] Popat S. y Deshusses, M. A. (2008). Biological removal of siloxanes from landfill and digester gases: opportunities and challenges. *Environmental Science and Technology* 42:8510-8515.

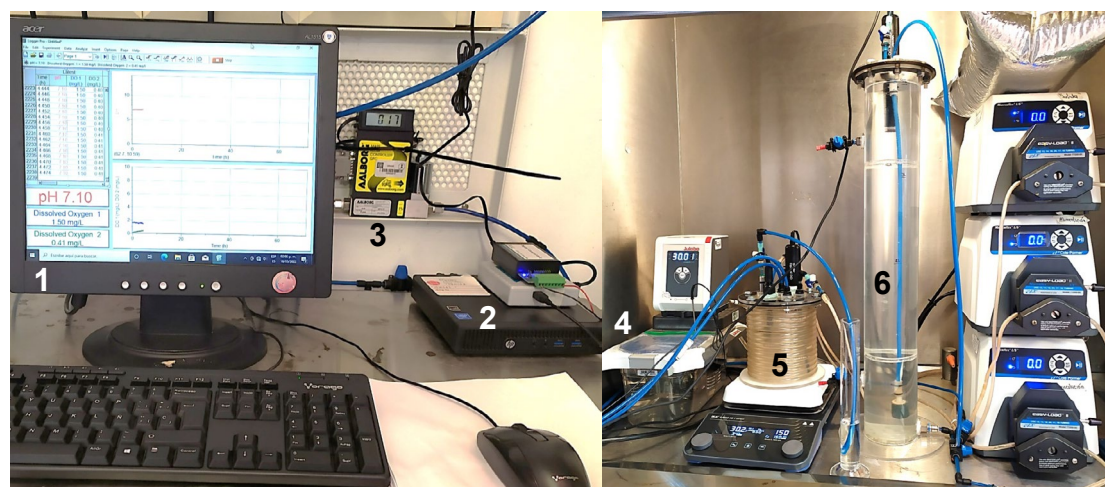


Figura 3. Prototipo de sistema biológico de purificación de biogás, (1,2) interfaz de usuario y tarjetas de adquisición de datos y control automático de pH, (3) control de flujo de entrada de biogás (4) control de temperatura, (5) biorreactor, (6) columna de absorción