CONAMA 2026

Valorización de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia

Empleo de biochar como aditivo para la mejora de la producción de biometano

CONAMA 2026

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Miguel García Acedos (CIEMAT)

Otros Autores: Ángela Lao Zea (CIEMAT)

Vanessa Ripoll (Universidad Politécnica de Madrid)

Javier Contreras (CIEMAT)

Sara Parrondo (CIEMAT)

Andrea Medina Fuentes (CIEMAT)

María Luisa Ruiz Lorenzo (CIEMAT)

Silvia Suárez (CIEMAT)

Índice

Resumen **3**

Palabras clave **4**

1. Introducción **4**

2. Materiales y métodos **5**

2.1. Sustratos y materiales carbonosos 5

2.2. Ensayos de digestión anaerobia 6

3. Resultados y discusión **7**

4. Conclusiones **9**

5. Agradecimientos **10**

6. Bibliografía **10**

Resumen

La mejora de la producción de metano durante la digestión anaerobia de residuos orgánicos constituye un importante campo de investigación, especialmente debido a los factores que pueden limitar la actividad microbiana y la estabilidad del proceso. Entre las estrategias estudiadas destaca la incorporación de materiales carbonosos, como el biochar, por su potencial para favorecer la producción de metano. Una de las principales hipótesis que explican este efecto es que estos materiales pueden facilitar la transferencia directa de electrones entre especies microbianas (*direct interspecies electron transfer*, DIET), favoreciendo las interacciones entre los microorganismos implicados en la producción de metano.

En este trabajo se evalúa la influencia de diferentes materiales carbonosos sobre la producción de biogás y biometano mediante ensayos de potencial bioquímico de metano (BMP). Se estudian distintos residuos orgánicos, incluyendo mezclas de lodos de depuradora y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, posos de café y residuos de manzana procedentes de la industria de la sidra. Los aditivos estudiados incluyen *biochar* obtenido mediante pirólisis de digerido, así como materiales carbonosos comerciales. Se analiza la influencia del tipo de material carbonoso y de su concentración sobre la producción de biogás y metano, teniendo en cuenta las propiedades de los materiales estudiados.

Los resultados obtenidos muestran que el efecto de los materiales carbonosos varía en función de su origen, los tratamientos aplicados y el tipo de residuo utilizado durante la digestión anaerobia. Se observaron diferencias entre los materiales estudiados, con mejoras en determinados ensayos, mientras que en otros la incorporación de estos aditivos no produjo efectos positivos sobre la producción de metano. En los ensayos BMP realizados con posos de café, la incorporación de B1 (46 m^2/g) permitió aumentar la producción acumulada de metano un 11,6 % respecto al control. Por otra parte, en los ensayos realizados con residuos de manzana, la incorporación de B1 a una concentración de 5 g/L aumentó el contenido de metano en el biogás del 54,7 % al 58,7 %, aunque la producción específica de biogás fue inferior a la del control. Al aumentar la concentración de B1, disminuyeron tanto la producción de biogás como la de metano, y el contenido de metano se redujo ligeramente hasta el 57,5 %. Los materiales carbonosos comerciales también mostraron comportamientos diferentes: mientras que el carbón activado Norit® (1400 m^2/g) no proporcionó mejoras en la producción de metano en las condiciones estudiadas, el carbón mesoporoso grafitizado (81 m^2/g) aumentó el contenido de metano en el biogás de residuos de manzana del 54,7 % al 63,8 %.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que la incorporación de materiales carbonosos puede producir cambios en la producción de biogás y metano durante la digestión anaerobia, aunque su efecto depende del material utilizado y de las condiciones del ensayo. Estos resultados sugieren que la superficie específica no es factor determinante en el comportamiento de los materiales carbonosos y que podrían intervenir otras propiedades. Por tanto, sería necesario realizar estudios adicionales para comprender mejor las causas de las diferencias observadas, entre las que podría encontrarse la DIET entre especies microbianas.

Palabras clave

Digestión anaerobia; biochar; producción de metano; transferencia directa de electrones entre especies (DIET); valorización de residuos orgánicos.

1. Introducción

La digestión anaerobia es una tecnología ampliamente utilizada para el tratamiento y la valorización de residuos orgánicos, mediante la transformación biológica de la materia orgánica en biogás, que puede emplearse para generar electricidad y calor o someterse a un proceso de enriquecimiento para obtener biometano. Además de permitir la recuperación energética de los residuos, este proceso contribuye a reducir la cantidad de materia orgánica destinada a vertedero y genera un digerido rico en nutrientes que puede ser objeto de posteriores procesos de valorización. Por ello, la digestión anaerobia constituye una tecnología de interés dentro del modelo de economía circular [1].

Sin embargo, la digestión anaerobia es un proceso biológico complejo en el que intervienen diferentes grupos de microorganismos y rutas metabólicas. Su funcionamiento depende de diversos factores, entre los que destacan la composición química y la biodegradabilidad del sustrato, especialmente su contenido en carbono y nitrógeno, así como las condiciones de operación en las que se desarrolla la actividad microbiana [2]. Durante el bioproceso pueden producirse fenómenos de inhibición debido a diferentes factores, como la acumulación de ácidos grasos volátiles, los desequilibrios de pH, la presencia de concentraciones elevadas de amoníaco, determinados compuestos tóxicos o la degradación incompleta y acumulación de compuestos orgánicos recalcitrantes, entre otros. Estos factores pueden afectar a la actividad de los microorganismos implicados, reducir la estabilidad del proceso y limitar la recuperación energética de los residuos [3]. Por tanto, resulta de interés estudiar estrategias que permitan mejorar la estabilidad del proceso y favorecer la producción de metano.

En este contexto, la incorporación de aditivos, como el *biochar*, ha despertado un gran interés por su potencial para mejorar el funcionamiento de la digestión anaerobia y aumentar la producción de metano. El *biochar* es un material carbonoso que se obtiene mediante la transformación termoquímica de diferentes materias primas, generalmente mediante pirólisis en ausencia o limitación de oxígeno. Sus características pueden variar considerablemente en función del material de partida y de las condiciones utilizadas durante su obtención, especialmente la temperatura de pirólisis [4]. Estas diferencias pueden dar lugar a materiales con distintas propiedades fisicoquímicas y texturales, como el área superficial específica, la porosidad y la composición química, que pueden influir en su comportamiento cuando se incorporan al proceso de digestión anaerobia.

El mecanismo por el cual la presencia de biochar durante el proceso de digestión anaerobia puede favorecer la estabilidad microbiana y aumentar la producción de biometano todavía no se conoce por completo. Una de las hipótesis más estudiadas es que puede favorecer la transferencia directa de electrones entre especies microbianas (DIET). Este mecanismo consiste en el intercambio directo de electrones entre microorganismos que participan en la degradación de la materia

orgánica, sin necesidad de utilizar compuestos intermediarios como el hidrógeno o el formiato. La transferencia puede producirse mediante estructuras y proteínas de la membrana de los microorganismos, como determinados pili y citocromos, que permiten el intercambio electrónico entre bacterias y arqueas [5]. Este mecanismo puede favorecer las interacciones sintróficas entre bacterias y arqueas metanógenas y las rutas metabólicas implicadas en la producción de metano, incluida la reducción de CO_2 [6]. En este sentido, el *biochar* puede facilitar la transferencia de electrones no solo por su conductividad eléctrica, sino también por la presencia de grupos funcionales con actividad redox, como las quinonas, que pueden actuar como mediadores en el intercambio de electrones entre microorganismos. Asimismo, su estructura porosa puede favorecer el crecimiento y la inmovilización microbiana, mientras que su incorporación puede contribuir a acelerar la degradación de los ácidos grasos volátiles y reducir la fase de adaptación del proceso. Estas propiedades dependen, entre otros factores, de la materia prima utilizada y de las condiciones de pirólisis, especialmente de la temperatura, que puede influir en la conductividad eléctrica del material [7]. A pesar de esto, en la literatura se pueden encontrar publicaciones que apuntan a otros mecanismos, como la mejora de la capacidad amortiguadora del pH del medio, la reducción de determinados fenómenos de inhibición y la provisión de una superficie porosa que puede favorecer la inmovilización de los microorganismos implicados en el proceso [8].

Por otra parte, el efecto del *biochar* puede variar en función de su origen, sus propiedades fisicoquímicas y texturales, así como del tipo de residuo utilizado como sustrato durante la digestión anaerobia. En un trabajo previo se estudió la valorización de digeridos procedentes de la co-digestión anaerobia de FORSU y lodos de depuradora mediante su transformación en materiales carbonosos para la captura de CO_2, incluyendo la caracterización de los *biochar* modificados [9]. Este trabajo proporciona una base para estudiar la posible relación entre las propiedades de estos materiales y su comportamiento como aditivos en la digestión anaerobia. Asimismo, la concentración de biochar añadida es otro factor relevante, ya que una mayor dosis no implica necesariamente un aumento de la producción de metano. Por tanto, resulta necesario estudiar la influencia de estas características y comparar el comportamiento de diferentes materiales carbonosos en función de las condiciones experimentales y de los sustratos utilizados.

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de diferentes materiales carbonosos sobre la producción de biogás y metano mediante ensayos discontinuos de BMP. Para ello, se utilizan distintos sustratos, entre ellos mezclas de lodos de depuradora y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, posos de café y residuos de manzana procedentes de la industria de la sidra. Los materiales estudiados incluyen biochar obtenidos mediante pirólisis de digeridos, así como carbones comerciales. Asimismo, se pretende estudiar cómo las características de estos materiales pueden influir en los resultados obtenidos durante la digestión anaerobia.

2. Materiales y métodos

2.1. Sustratos y materiales carbonosos

Para evaluar la influencia de los materiales carbonosos sobre la producción de biogás y metano, se realizaron ensayos de digestión anaerobia utilizando diferentes residuos orgánicos como sustratos.

Entre ellos se incluyeron mezclas de lodos de depuradora y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos en proporción 50:50 (p/p) (LD50F50), posos de café (PC) y residuos de manzana (RM) procedentes de la industria de la sidra.

Los materiales carbonosos estudiados como bioestimulantes incluyeron un *biochar* obtenido mediante pirólisis del digerido procedente de la codigestión anaerobia de lodos de depuradora y FORSU, en proporción 50:50 (p/p). Previamente, el digerido se secó a 105 °C hasta eliminar su contenido de agua y posteriormente se sometió a molienda y tamizado. La pirólisis se llevó a cabo a 500 °C en un reactor tubular de cuarzo, bajo una atmósfera inerte de nitrógeno, con un caudal de 200 mL/min. El material obtenido se denominó B1. Además, se evaluaron dos materiales carbonosos comerciales: carbón activado Norit®, CA (Sigma-Aldrich, CAS: 7440-44-0) y carbón mesoporoso grafitizado, C1 (Sigma-Aldrich, CAS:1333-86-4). La incorporación de estos materiales permitió comparar el comportamiento de los biochars obtenidos a partir de residuos con el de otros materiales carbonosos de diferente naturaleza.

Las propiedades texturales de los materiales carbonosos se estudiaron mediante isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno a −196 °C, utilizando un analizador Micromeritics ASAP 2020. El área superficial específica se determinó mediante el método Brunauer–Emmett–Teller (BET), mientras que el volumen de poro se calculó mediante el método Barrett–Joyner–Halenda (BJH). Previamente al análisis, las muestras se sometieron a un proceso de desgasificación a 100 °C durante 16 horas, con el fin de eliminar la humedad y las moléculas adsorbidas.

2.2. Ensayos de digestión anaerobia

La producción de metano se evaluó mediante ensayos discontinuos de potencial bioquímico de metano (BMP), utilizando el sistema automático AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System, Bioprocess Control, Lund, Suecia). Este equipo consta de tres unidades: una unidad de reacción, una unidad de absorción de CO_2 y una unidad de medición del metano producido.

La producción de biogás se determinó mediante el sistema ANKOM RF Gas Production System (ANKOM Technology, Estados Unidos), que registra automáticamente la presión y la temperatura durante el proceso. Los valores de presión registrados se convirtieron en volúmenes de biogás (NmL) mediante la ley de los gases ideales y el principio de Avogadro. La producción de biogás se expresó como volumen de gas por gramo de sólidos volátiles (NmL/g_{SV}).

$$\text{Volumen Biogas } (\text{Nml}) = [V_H \cdot (P_S - P_I) \cdot R \cdot T \cdot 22.4 \cdot 1000] \qquad [1]$$

Donde V_H es el volumen del espacio de cabeza (mL); P_S y P_i son las presiones medidas (kPa) para la muestra y el inóculo, respectivamente; R es la constante universal de los gases (8,314472 L·kPa·K^{-1}·mol^{-1}) y T es la temperatura (K).

Los ensayos se realizaron en condiciones mesófilas, a una temperatura de 37 °C. Se utilizaron reactores con un volumen de trabajo de 400 mL. La relación inóculo se estableció en función del contenido en sólidos volátiles (SV), utilizando una proporción de 2:1 para los ensayos con LD50F50 y RM, y de 1,5:1 para los ensayos con el sustrato PC. Los reactores se purgaron con nitrógeno para

garantizar condiciones anaerobias y los ensayos se mantuvieron en funcionamiento hasta alcanzar la estabilización de las curvas de producción de gas.

En los ensayos realizados con los diferentes sustratos, se incorporaron distintos materiales carbonosos como aditivos a los reactores de digestión anaerobia, utilizando concentraciones comprendidas entre 1 y 30 g/L, en función del material y de las condiciones experimentales. Los resultados obtenidos se compararon con los correspondientes ensayos control, realizados sin adición de materiales carbonosos, para evaluar su influencia sobre la producción de biogás y metano.

Se incluyeron ensayos sólo con inóculo (blancos) para determinar la producción de biogás y biometano endógena, procedente de la materia orgánica contenida en los propios inóculos. Los ensayos se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como producción específica de metano (NmL_{CH_4}/g_{SV}) y de biogás ($NmL_{biogás}/g_{SV}$).

3. Resultados y discusión

La incorporación de materiales carbonosos durante la digestión anaerobia de residuos de manzana procedentes de la industria de la sidra (RM) produjo diferencias en la producción de biogás (Figura 1a) y biometano (Figura 1b). El control alcanzó una producción de biogás de 552,5 NmL/g_{SV}, con un contenido de metano del 54,7 %. La adición de B1 a 5 g/L redujo ligeramente la producción de biogás hasta 523,9 NmL/g_{SV}, aunque aumentó el porcentaje de metano hasta el 58,7 %. Al aumentar la concentración de B1 de 5 a 10 g/L, disminuyeron tanto la producción de biogás como la de metano, y el porcentaje de metano en el biogás pasó del 58,7 % al 57,5 %. Estos resultados indican que aumentar la dosis de B1 no supone una mejora en la producción de biogás ni de metano. Por su parte, C1 a 5 g/L presentó la menor producción de biogás (461,7 NmL/g_{SV}), aunque alcanzó el mayor porcentaje de metano (63,8 %).

Las diferencias observadas entre B1 y C1 podrían estar relacionadas con las características de los materiales carbonosos. Ambos presentan superficies específicas relativamente similares, de 46 m^2/g para B1 y entre 50 y 100 m^2/g para C1 [10]. Sin embargo, su incorporación produjo resultados diferentes, especialmente en cuanto al contenido de metano en el biogás. Esto sugiere que, además de la superficie específica, podrían intervenir otras propiedades de los materiales que influyan en su comportamiento durante la digestión anaerobia. En este sentido, uno de los mecanismos propuestos en la literatura es la DIET, que puede favorecer las interacciones sintróficas entre los microorganismos implicados en la producción de metano [5]. La incorporación de materiales carbonosos podría facilitar este mecanismo, aunque serían necesarios estudios adicionales para comprobar su participación en los resultados obtenidos.

Para profundizar en la influencia de las propiedades superficiales, se consideraron los resultados de un experimento complementario de digestión anaerobia de PC, en el que se compararon B1 y CA, ambos incorporados a 10 g/L (Figura 2). A pesar de que CA presenta una superficie específica de 1400 m^2/g, aproximadamente 30 veces superior a la de B1 (46 m^2/g), su incorporación produjo una menor cantidad de metano que el control, mientras que B1 favoreció su producción. Concretamente, la incorporación de B1 incrementó la producción acumulada de metano un 11,6 %

respecto al control, mientras que la adición de CA provocó una disminución del 14,0 %. Este comportamiento indica que una mayor superficie específica, y por tanto una mayor superficie disponible para la adsorción, no se traduce necesariamente en una mejora de la producción de metano.

Por último, también se estudió el efecto de diferentes concentraciones de CA sobre la digestión anaerobia de LD50F50 (Figura 3). El ensayo control alcanzó una producción específica de metano de 371,0 NmL/g_{SV}, mientras que la incorporación de CA a concentraciones de 1 y 5 g/L redujo este valor hasta 360,2 y 314,6 NmL/g_{SV}, respectivamente. Esta disminución fue más pronunciada al aumentar la concentración de CA a 20 y 30 g/L, con producciones específicas de metano de 261,0 y 234,6 NmL/g_{SV}, respectivamente. La mayor concentración de CA produjo una reducción del 36,8 % respecto al control. Por tanto, se observa una disminución progresiva del rendimiento metanogénico al aumentar la dosis de CA, sin que ninguna de las concentraciones estudiadas proporcionara mejoras respecto al control. Estos resultados refuerzan lo observado en los ensayos anteriores y apoyan la idea de que una mayor superficie específica no implica necesariamente una mayor producción de metano.

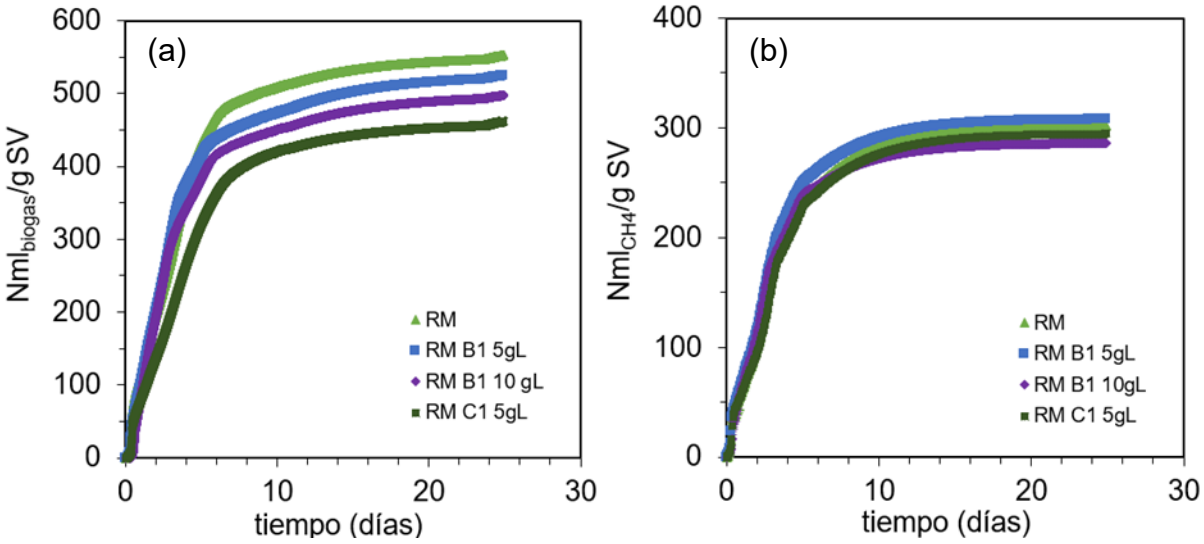


Figura 1. Producción acumulada de biogás (a) y metano (b) durante la digestión anaerobia de residuos de manzana procedentes de la industria de la sidra (RM), sin aditivos y con incorporación de B1 (5 y 10 g/L) y C1 (5 g/L).

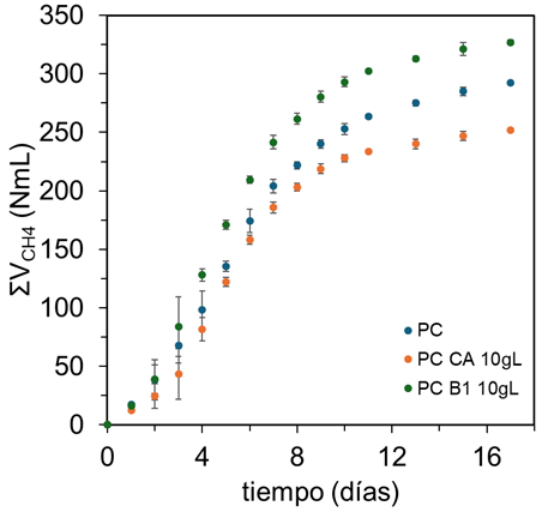


Figura 2. Producción acumulada de metano durante la digestión anaerobia de posos de café (PC), sin aditivos y con incorporación de B1 y carbón activado comercial (CA) a una concentración de 10 g/L.

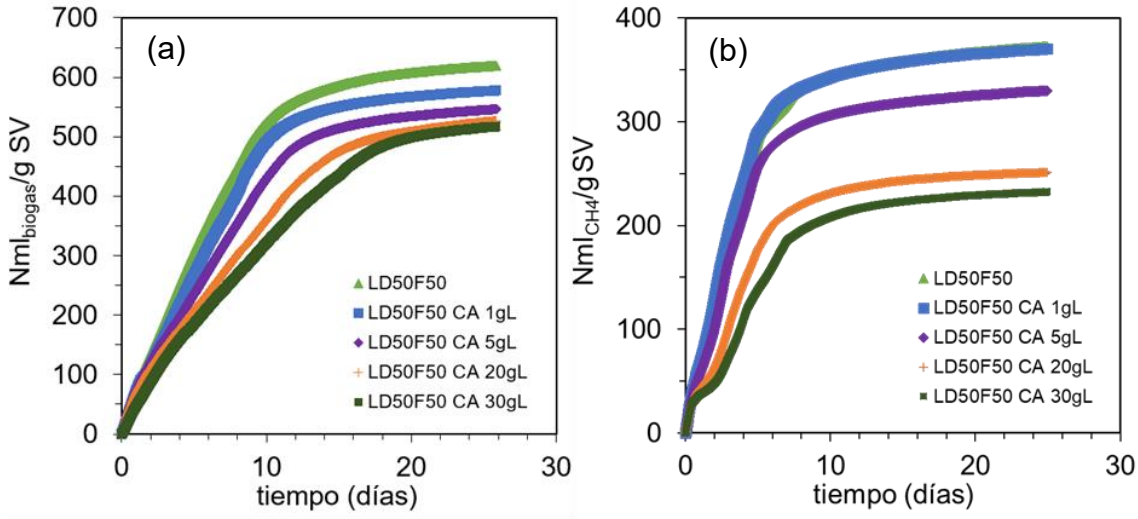


Figura 3. Producción acumulada de biogás (a) y metano (b) durante la digestión anaerobia de la mezcla LD50F50, sin aditivos y con incorporación de carbón activado comercial (CA) a diferentes concentraciones (1, 5, 20 y 30 g/L).

4. Conclusiones

En conjunto, los resultados obtenidos de los BMP con residuo de manzana, posos de café y mezclas de Lodo y FORSU muestran que el efecto de los materiales carbonosos sobre la digestión anaerobia varía en función de la naturaleza del carbón, su concentración y el sustrato empleado. Las diferencias observadas entre materiales carbonosos seleccionados, sugieren que la superficie específica no es el factor determinante en la producción de metano. La posible adsorción de los compuestos generados en el proceso, se ha de tener en cuenta para valorar la integridad del proceso.

En este contexto, el proceso DIET constituye uno de los posibles mecanismos que podrían contribuir a explicar las diferencias observadas. Sin embargo, hay que tener en cuenta otros factores

asociados a las características de los materiales y a sus interacciones con los microorganismos. Estudios adicionales de las comunidades microbianas serían necesarios para confirmar la participación de este mecanismo, y comprender mejor el comportamiento de los materiales carbonosos en el proceso de digestión anaerobia.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, en el marco del proyecto «BIOFORAIR», PID2022-138682OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033. Los autores agradecen el apoyo recibido a través del contrato PTA2022-022087-I. A. Lao-Zea desea agradecer el apoyo financiero de este Ministerio (PTA2022–022087-I). Este trabajo también ha contado con el apoyo del Gobierno de Madrid (Comunidad de Madrid, España) en el marco del Convenio Plurianual 2023-2026 con la Universidad Politécnica de Madrid, Línea A: Investigadores doctorales emergentes (Ref. DOCTORES-EMERGENTES-24–61370V-58-OBSZ79).

6. Bibliografía

[1] Huang (2024): Huang, X. (2024): "The promotion of anaerobic digestion technology upgrades in waste stream treatment plants for circular economy in the context of 'dual carbon': Global status, development trend, and future challenges", *Water*, 16 (24): 3718.

[2] Kumar *et al.* (2024): Kumar, D.J.P., R.K. Mishra, S. Chinnam, P. Binnal y N. Dwivedi (2024): "A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: a review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends", *Biotechnology Notes*, 5: 33-49.

[3] Zhao *et al.* (2021): Zhao, W., H. Yang, S. He, Q. Zhao y L. Wei (2021): "A review of biochar in anaerobic digestion to improve biogas production: performances, mechanisms and economic assessments", *Bioresource Technology*, 341: 125797.

[4] Wang y Wang (2019): Wang, J. y S. Wang (2019): "Preparation, modification and environmental application of biochar: a review", *Journal of Cleaner Production*, 227: 1002-1022.

[5] Rotaru et al. (2014): Rotaru, A.-E., P. M. Shrestha, F. Liu, B. Markovaite, S. Chen, K. P. Nevin y D. R. Lovley (2014): "Direct interspecies electron transfer between Geobacter metallireducens and Methanosarcina barkeri", Applied and Environmental Microbiology, 80 (15): 4599-4605.

[6] Liu *et al.* (2021): Liu, Y., X. Li, S. Wu, Z. Tan y C. Yang (2021): "Enhancing anaerobic digestion process with addition of conductive materials", *Chemosphere*, 278: 130449.

[7] Valentin *et al.* (2023): Valentin, M.T., G. Luo, S. Zhang y A. Białowiec (2023): "Direct interspecies electron transfer mechanisms of a biochar-amended anaerobic digestion: a review", *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16: 146.

[8] Chiappero et al. (2020): Chiappero, M., O. Norouzi, M. Hu, F. Demichelis, F. Berruti, F. Di Maria, O. Mašek y S. Fiore (2020): "Review of biochar role as additive in anaerobic digestion processes", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 131: 110037.

[9] Lao-Zea *et al.* (2026): Lao-Zea, A., M.G. Acedos, M.A. Herrero, D. Álvarez, B. Gómez, R. Iglesias *et al.* (2026): "Anaerobic co-digestion of OFMSW and sewage sludge: Digestate valorisation into advanced CO_2 capture materials", *Journal of Environmental Chemical Engineering*: 122070.

[10] Jansson *et al.* (2021): Jansson, I., F.J. García-García, B. Sánchez, S. Suárez (2021): "Key factors to develop hybrid photoactive materials based on mesoporous carbon/TiO_2 for removal of volatile organic compounds in air streams", *Applied Catalysis A*: 118281.

CONAMA 2026