



Aprovechamiento de residuos sólidos y tratamiento de agua: un enfoque integrado desde el Cuerpo Académico de Biotecnología y Bioingeniería de la FIQ-UADY

Solid waste use and water treatment: an integrated approach from the Research Group of Biotechnology and Bioengineering of the FIQ-UADY

Mónica Noél Sánchez-González³
Araceli González-Burgos⁴
Juan Enrique Ruiz-Espinoza
Alejandro Zepeda-Pedreguera

Resumen

Yucatán posee características geográficas, climáticas e hidrológicas, que aunadas a las condiciones económicas y sociales de la entidad han consolidado a la industria agroalimentaria en la región, con las ventajas económicas y el impacto ambiental que ello implica. La industria agroalimentaria genera residuos sólidos y líquidos que deben ser tratados adecuadamente para evitar dañar el medio ambiente o causar enfermedades. En el cuerpo académico de biotecnología y bioingeniería (CABB) se han desarrollado estrategias para gestionar los residuos sólidos generados por la agroindustria a través de la valorización de estos residuos y el mejoramiento de la digestión anaerobia en residuos sólidos a través de pretratamientos y el uso de nanopartículas. Además, en sistemas acuosos, los esfuerzos se han concentrado en la evaluación

3 Cuerpo Académico de Biotecnología y Bioingeniería- Facultad de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Yucatán.

4 Autor para correspondencia: araceli.gonzalez@correo.uady.mx

de novedosos bioprocesos sustentables sobre la eliminación de contaminantes peligrosos utilizando nanomateriales. De esta manera, el CABB contribuye a la preservación ambiental y al desarrollo económico de la región.

Palabras clave: Valorización, residuos agroindustriales, digestión anaerobia, bioprocesos, nanomateriales, tratamiento de agua residual.

Abstract

Yucatan has geographical, climatic and hydrological characteristics, which together with the economic and social conditions of the entity have led to the consolidation of the agri-food industries in the region, with the economic advantages and environmental impact that this implies. The agri-food industry generates solid and liquid waste that must be treated properly to avoid damaging the environment or causing diseases. In the academic group of biotechnology and bioengineering (CABB), strategies have been developed to manage the solid waste generated by agribusiness through the valorization of this waste and the improvement of anaerobic digestion in solid waste through pretreatments and the use of nanoparticles. In aqueous systems, efforts have been concentrated to evaluate process and bioprocess on the removal of hazardous contaminants using nanomaterials. In this way, the CABB contributes to the environmental preservation and economic development of the region.

Key words: Valorization, agro-industrial waste, anaerobic digestion, bioprocesses, nanomaterials, wastewater treatment.

Introducción

La generación de residuos, tanto sólidos como líquidos, es un tema de relevancia mundial, no solo por su impacto ambiental, sino también por su potencial de aprovechamiento en el desarrollo sustentable. Los residuos son materiales generados de manera no intencional durante los procesos de manufactura y, en lugar de ser desechados, pueden ser valorizados para obtener productos químicos con potencial comercial. La valorización es una estrategia alternativa para transformar los



residuos en productos útiles como materias primas (enzimas, ácidos orgánicos, entre otros), fertilizantes o biocombustibles. Este enfoque permite disminuir su impacto negativo en el medio ambiente y, al mismo tiempo, contribuir al desarrollo económico.

En cuanto a los residuos líquidos, la situación es crítica. Del 3% de agua dulce disponible en el mundo, solo el 1% está disponible para el consumo humano. A medida que se incrementa el consumo de agua en la industria, el riesgo de contaminación hídrica aumenta, especialmente en países en desarrollo, donde el 70% de los residuos industriales se vierten directamente en los cuerpos de agua, sin tratamiento previo. Esto agrava la crisis de agua, afectando a casi la quinta parte de la población mundial que ya vive en áreas de escasez física de agua.

Entre las industrias más importantes del estado de Yucatán se encuentran las agroalimentarias, destacando la porcícola, avícola y de producción de alimentos. El crecimiento de estas industrias constituye un gran reto para la región debido a la generación de residuos sólidos y líquidos que contaminan los ecosistemas característicos del estado y pueden generar problemas para la salud humana. A este respecto, el cuerpo académico de biotecnología y bioingeniería (CABB) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIQ-UADY), realiza esfuerzos para que a través de la Biotecnología y Nanotecnología se encuentren soluciones para la eliminación y/o aprovechamiento de los residuos generados en la región.

Biocatálisis en la valorización de residuos.

La biotecnología utiliza organismos vivos o sus componentes para la valorización de residuos. Valorizar implica procesar residuos para obtener productos que sean atractivos comercialmente (1). Entre las herramientas utilizadas por la biotecnología para este fin, se encuentran los biocatalizadores, elementos biológicos capaces de aumentar la velocidad de una reacción (2). Es decir, si una reacción se realiza en horas, la adición de un biocatalizador ocasiona que se realice en fracciones de segundo. Las enzimas son los biocatalizadores más abundantes en la naturaleza y constituyen el motor del metabolismo. Los microorganismos representan una fuente importante de enzimas. El

término biocatalizador se refiere entonces a enzimas aisladas o a células microbianas que contienen enzimas activas.

La industria agroalimentaria produce grandes cantidades de residuos que pueden ocasionar daños ambientales o pueden ser utilizados para diferentes fines comerciales. Un ejemplo de residuo agroindustrial es el pericarpio de maíz generado por la industria de la tortilla. Para la producción de tortillas, los granos de maíz se cuecen con cal, a este proceso se le conoce como nixtamalización. Como producto de este cocimiento se obtiene la masa con la que se elaboran las tortillas (nixtamal) y un residuo líquido conocido como nejayote. El nejayote es rico en materia orgánica, proteínas y azúcares, así como componentes del grano como el embrión, pedúnculo (a veces conocido como la cabeza del grano) y el pericarpio de maíz (3). El nejayote y el pericarpio han sido material de nuestros estudios ya que poseen componentes de interés comercial utilizados para la producción de biocombustibles, bioplásticos, cosméticos, prebióticos (alimento para los microorganismos benéficos del intestino), etc.

El ácido ferúlico presente en el pericarpio de maíz y nejayote es un antioxidante usado en cosméticos y alimentos. En el CABB se han desarrollado metodologías para la cuantificación y recuperación del ácido ferúlico del nejayote utilizando micro y nanomoléculas (4). En el pericarpio de maíz, el ácido ferúlico se encuentra unido químicamente a azúcares por lo que es necesario degradarlo para recuperar tanto el ferúlico como los azúcares que lo componen. La dificultad en el aprovechamiento del pericarpio, es que los azúcares presentes poseen una estructura difícil de degradar. Una opción es la utilización de biocatalizadores. En el CABB se ha estudiado la composición del pericarpio y utilizado comunidades microbianas para degradar este residuo. Los resultados de nuestros estudios indican que los microorganismos utilizan diferentes enzimas (hidrolíticas y oxidativas) que trabajan de manera cooperativa y ordenada (3). Adicionalmente, encontramos que, para facilitar el trabajo de las enzimas, los microorganismos producen peróxido de hidrógeno, logrando degradar más del 90% de este residuo.

Aunque estos resultados se pueden comentar en un párrafo, se ha necesitado la utilización de diferentes estrategias experimentales para lograrlos y la participación de diferentes colaboradores alumnos y

profesores. Entre las estrategias utilizadas están las microbiológicas para el cultivo de los microorganismos. Una vez que logramos encontrar las condiciones de cultivo para el trabajo eficiente de los microorganismos, estudiamos su ADN para saber quiénes están presentes y qué son capaces de hacer. A los estudios que permiten analizar el ADN de un gran número de microorganismos presentes en una comunidad, se les conoce como metagenómicos. ¿Se imaginan conocer el ADN de decenas o centenas de microorganismos? A través de estos estudios se obtiene gran cantidad de información que se procesa utilizando programas computacionales. Nuestro trabajo no termina con saber las capacidades metabólicas potenciales de los microorganismos, sino también necesitamos conocer cuáles se usan para degradar el pericarpio, en qué momento se utilizan y bajo qué circunstancias. Lo anterior, se ha logrado determinar analizando secuencias de ARN (ácido ribonucleico) de procesos transcripcionales (metatranscriptómica) y de proteínas (metaproteómica) (5,6). Los resultados se han integrado a estudios bioquímicos de actividad enzimática y químicos que analizan cambios en la composición del pericarpio residual. De esta manera hemos propuesto el modelo de la degradación del pericarpio por bacterias (Figura 1).

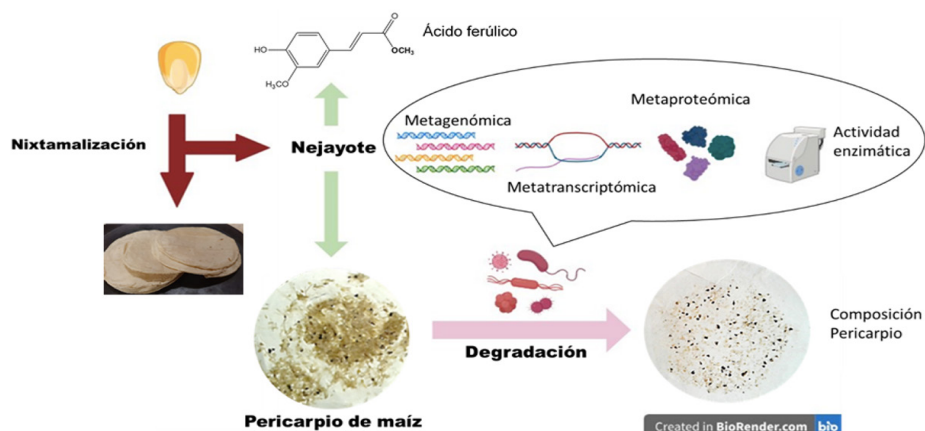


Figura 1. Estrategia utilizada para el estudio del mecanismo de degradación del pericarpio de maíz por una comunidad bacteriana.

¿Cuál es el siguiente paso? Tener comunidades es interesante, pero los microorganismos degradan los residuos para comerse las moléculas que se obtienen y nosotros las queremos recuperar. Nuestros

esfuerzos ahora están dirigidos a establecer un proceso enzimático sin la presencia de los microorganismos para recuperar los productos y valorizar el residuo.

Adicionalmente al pericarpio de maíz, el grupo de biocatálisis aplicada del CABB, analiza la degradación del sargazo y un alga roja (*Halymenia floresii*) que se acumulan en las costas de Yucatán. De esta manera se pretende producir enzimas que logren su degradación para recuperar los azúcares y otros químicos de interés presentes en su estructura, para valorizarlos, generar beneficios a la salud y evitar daños ambientales.

Biotecnología anaerobia en el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos.

En Yucatán algunos de los residuos generados de gran impacto ambiental son los lodos residuales, los cuales son producto del tratamiento de las aguas residuales, la pollinaza (excreta de aves con material de la cama) y gallinaza (excreta) de la industria avícola y las excretas porcinas. Estos residuos se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica y nutrientes (fósforo y nitrógeno), pero también altas concentraciones de microorganismos patógenos, los cuales pueden provocar enfermedades en la población debido a la atracción de vectores como moscas, mosquitos, roedores, que provocan la diseminación de los patógenos y enfermedades. La NOM 004 SEMARNAT 2002 (7), establece que para que estos residuos sean convertidos en biosólidos es necesario cumplir con un criterio de reducción de atracción de vectores, cumplir con límites de metales, patógenos (*Salmonella spp*), parásitos (huevos de helmintos) e indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales) (8).

Existen diferentes alternativas para tratar o aprovechar estos residuos; entre ellas, la digestión anaerobia destaca por estabilizar la materia orgánica y producir bioenergía. Este proceso genera un biogás rico en metano o biohidrógeno (dos fases) y biosólidos aplicables a suelos y cultivos, aportando materia orgánica estabilizada, nutrientes y microelementos.

La digestión anaerobia a su vez es capaz de generar bonos de carbono para las empresas que traten sus residuos, generen biogás o biometano y puedan utilizarlo en la generación de energía. Estos bonos

pueden ser pagados por países desarrollados como un bien de intercambio para que ellos puedan emitir CO₂. Sin embargo, este proceso a pesar de contar con estos beneficios aun presenta inconvenientes, los cuales están relacionados con los largos tiempos necesarios para estabilizar los residuos (más de 20 días), no inactiva grandes cantidades de patógenos (<2log), baja biodegradabilidad (lignocelulosa) y bajos rendimientos de biogás para algunos residuos ya que solo una pequeña fracción de la masa del residuo es convertida en gas (8).

Para mejorar el proceso de la digestión anaerobia y minimizar estas limitaciones, en el CABB se han propuesto diferentes estrategias, las cuales se pueden dividir en dos grandes grupos: pretratamientos a la biomasa residual y aditivos metálicos y carbonáceos (Figura 2).

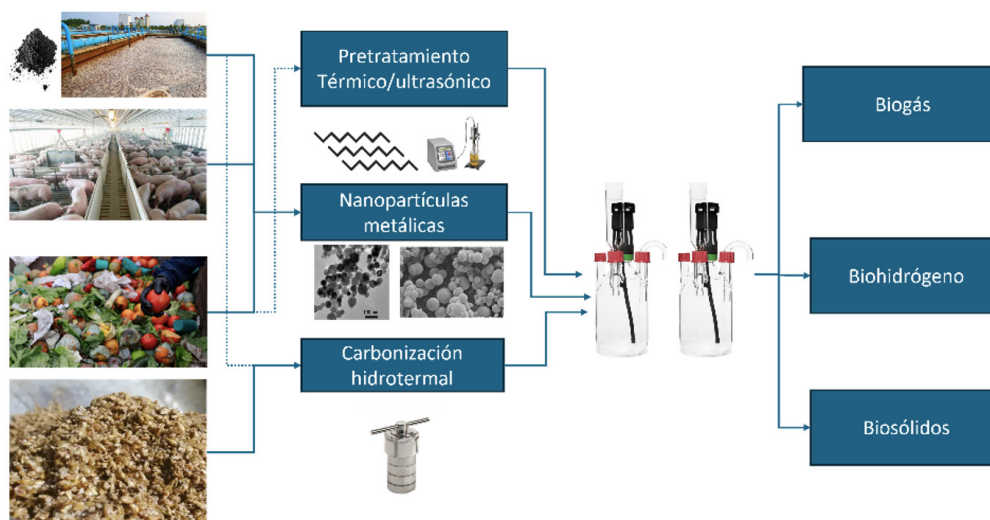


Figura 2. Aplicación de tecnologías para el mejoramiento de la digestión anaerobia.

Los pretratamientos tienen la función de romper las estructuras en los residuos sólidos orgánicos, hidrolizar los compuestos para ser más fácilmente degradables por un consorcio de microorganismos anaerobios, además de inactivar los microorganismos patógenos de los residuos (9).

El pretratamiento térmico consiste en elevar la temperatura del residuo sólido diluido con agua hasta alcanzar la temperatura de 70 a 90°C durante tiempos de al menos 60 min, permitiendo que la materia orgánica se hidrolice y que los microorganismos patógenos se inactiven,

esto ha logrado que se incremente en más de 40% la producción de biogás en lodos residuales, reducir los tiempos del proceso en un 50% y producir biosólidos estables (10).

El pretratamiento ultrasónico ha involucrado la hidrólisis de los residuos, el incremento de las cargas orgánicas al biorreactor y la ruptura de los anillos aromáticos de fármacos como la sulfadiazina en excretas porcinas, diclofenaco, carbamazepina, fluoxetina y 17α etinil-estradiol en lodos residuales. Estos fármacos tienen un efecto negativo en la digestión anaerobia que va desde disminuir la producción de biogás hasta inhibir el proceso. El pretratamiento ultrasónico ha mejorado la degradación anaerobia de los contaminantes de manera significativa.

En el área de aditivos, el CABB ha estudiado diversos metales como el hierro, cobalto, níquel y molibdeno, que son micronutrientes esenciales para los microorganismos anaerobios. Esos metales como nanopartículas cero valentes y combinaciones de hierro y níquel con dióxido de titanio demostraron mejorar los procesos anaerobios, incrementar la producción de biogás y el contenido de metano e hidrógeno. También favorecieron la degradación de fármacos y ayudaron a recuperar sistemas anaerobios inhibidos por alta carga y acidificación (11,12).

La nanoferrosonicación ha sido un proceso generado en el grupo de bioprocesos anaerobios del CABB, combinando la cavitación ultrasónica y formación de radicales oxidrilos provocando que no solo la materia orgánica de los residuos se hidrolice, sino la degradación parcial de los fármacos, así como el incremento en la producción de biogás (13). Otra estrategia para aprovechar los residuos es la generación de hidrocarbones por procesos hidrotermales, este método consiste en carbonizar la biomasa en presencia de agua a temperaturas mayores a 150°C y presión. Los hidrocarbones mejoran la transferencia de electrones, la adsorción de contaminantes, la regulación del pH, la producción de biogás y la degradación del ácido propiónico. Estos hidrocarbones sintetizados con la adición de metales ha logrado incrementar un 340% la generación de biogás y 43% la concentración de metano en la degradación de lodos residuales activados (14).

Biotechnología y nanotecnología en el tratamiento sustentable de agua y agua residual.

La contaminación en los cuerpos de agua ha ido incrementando, a lo largo de los años, debido a la falta de un tratamiento adecuado del agua y agua residual en las industrias, así como a la falta de conciencia de la sociedad, y el poco apego a las normativas de vertido del agua y agua residual. Entre los contaminantes más importantes se encuentran la materia orgánica (macro, mini, micro y nanocompuestos), compuestos nitrogenados (principalmente, amonio, nitrito y nitrato) y metales pesados. Siendo estos últimos considerados los más dañinos, debido a su baja biodegradabilidad y alta toxicidad para el ser humano. Por ejemplo, el consumo excesivo de cobre en el ser humano puede provocar enfermedades gastrointestinales y problemas ambientales. Los niveles de níquel superiores al permitido pueden generar problemas renales, pulmonares, dermatitis e incluso cáncer. Es por ello que la presencia de estos contaminantes en agua potable y agua residual han sido regulados por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés).

Debido a esta problemática, el CABB ha trabajado en el desarrollo de estrategias para llevar a cabo la eliminación de dichos contaminantes. Se ha generado investigación multidisciplinaria involucrando la participación de diferentes instituciones nacionales y extranjeras, con el objetivo de establecer novedosos procesos y bioprocesos sustentables en pro de la calidad de vida del ser humano y del medio ambiente (Figura 3).

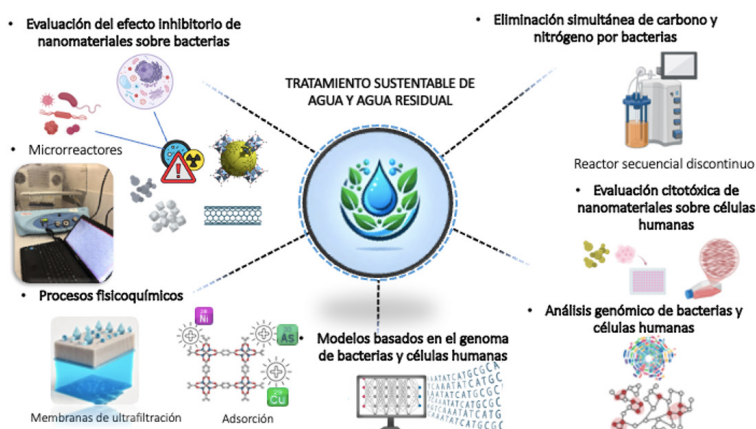


Figura 3. Estrategias multidisciplinarias para el tratamiento sustentable de agua y agua residual.

Para la realización de estas investigaciones se han obtenido fondos nacionales e internacionales proporcionados por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) e Instituto Universitario de California para México y los Estados Unidos (UCMEXUS), los cuales han sido de gran apoyo para el fortalecimiento de dicha investigación multidisciplinaria y multi-institucional.

Los resultados de investigaciones sobre la eliminación biológica de contaminantes del agua de la industria química y de refinería como el fenol, *o*-, *m*- y *p*-cresol (compuestos fenólicos) y el amonio, han sido novedosos. Se logró la eliminación completa de los compuestos fenólicos y la oxidación del amonio a nitrato, que puede transformarse a nitrógeno molecular (15). Modelos basados en productos intermedios e información genética han permitido comprender las rutas de eliminación y/o consumo de contaminantes que pueden realizar una comunidad bacteriana en presencia y ausencia de múltiples factores ambientales como el tipo y concentración del contaminante, pH, temperatura, concentración de oxígeno disuelto en el agua, entre otros (16). También se han realizado estudios avanzados con microreactores para evaluar la interacción de bacterias con nanomateriales, identificando hasta 24 reacciones simultáneas con diferentes condiciones de alimentación (17).

El CABB ha trabajado durante 12 años en el uso de diversos nanomateriales tales como los nanotubos de carbono, nanopartículas de plata y compuestos organometálicos (MOFs por sus siglas en inglés) como material adsorbente de metales pesados y colorantes presentes en el agua residual. Se han registrado capacidades de adsorción de plomo con MOF 18 veces mayor que el obtenido con nanoadsorbentes magnéticos. Así mismo, los MOFs han sido estudiados en la fabricación de membranas de ultrafiltración obteniendo un incremento de un 360% en la permeabilidad en comparación con la membrana sin la presencia de estos nanomateriales (18).

En la búsqueda de novedosos sistemas de tratamiento de agua y agua residual, el CABB ha evaluado nanomateriales tipo MOF con cobalto (MOF-Co) sobre las bacterias en lodos activados, mostrando que no dañan las bacterias nitrificantes y pueden ayudar a mitigar el efecto



del arsénico o níquel hasta un 100% debido a su estructura química y a la velocidad de adsorción de dichos metales (17). No obstante, es de suma importancia continuar con este tipo de investigaciones, debido a que estudios recientes realizados por el CABB, han mostrado información de que un nanocompuesto organometálico con Terbio (MOF-Tb), puede inducir efectos carcinogénicos, promoviendo la expresión de genes relacionados con esta enfermedad sobre células humanas de fibroblastos (19). La nanotecnología, ofrece el mejoramiento de la calidad de vida del ser humano y del medio ambiente, pero requiere un uso responsable considerandos sus alcances, efectos y aplicaciones antes de ser utilizada a gran escala.

Conclusiones

Las estrategias desarrolladas en el CABB para el aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos, promueven la transición hacia la economía circular, en la que los residuos se transforman en recursos, minimizando así su impacto en el medio ambiente y fomentando un modelo de desarrollo más sostenible.

Los enfoques multidisciplinarios integran novedosas tecnologías en el tratamiento de agua, agua residual y residuos, buscando un equilibrio entre el desarrollo industrial y la preservación de los recursos hídricos y ambientales.

El conocimiento y los procesos generados en el CABB para el aprovechamiento de residuos agroindustriales o tratamiento de aguas contaminadas son aplicables en Yucatán, México y el mundo.

Referencias

1. Hoang TD, Van Anh N, Yusuf M, Ali S. AM, Subramanian Y, Hoang Nam N, Minh Ky N, Le VG, Thi Thanh Huyen N, Abi Binasari A, K Azad A. Valorization of Agriculture Residues into Value-Added Products: A Comprehensive Review of Recent Studies. *Chemical Record*. 2024, 24(8): e202300333. doi: 10.1002/tcr.202300333.
2. Barcelos MCS, Ramos CL, Kuddus M, Rodriguez-Couto S, Srivastava N, Ramteke PW, Mishra PK, Molina G. Enzymatic potential for the valorization of agro-industrial by-products. *Biotechnology Letters*. 2020; 42(10):1799–827. doi: 10.1007/s10529-020-02957-3.
3. Serrano-Gamboa JG, Rojas-Herrera RA, González-Burgos A, Folch-Mallol JL, Jiménez DJ, Sánchez-González MN. Degradation profile of nixtamalized maize pericarp by the action of the microbial consortium PM-06. *AMB Express*. 2019; 9(1):2-12. doi: 10.1186/s13568-019-0812-7.
4. Dávila-Guzman NE, Cerino-Córdova FJ, Diaz-Flores PE, Rangel-Mendez JR, Sánchez-González MN, Soto-Regalado E. Equilibrium and kinetic studies of ferulic acid adsorption by Amberlite XAD-16. *Chemical Engineering Journal*. 2012; 15 (183):112–116. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.037>.
5. Serrano-Gamboa GJ, Fócil-Espinosa CA, Cabello-Yeves PJ, Coutinho FH, Rojas-Herrera RA, Sánchez-González MN. Metatranscriptome Profiling of a Specialized Microbial Consortium during the Degradation of Nixtamalized Maize Pericarp. *Microbiology Spectrum*. 2022; 10 (1): e02318-21. doi: 10.1128/spectrum.02318-21.
6. Guzmán-Pedraza R, Medina Peralta S, Rojas-Herrera RA, Sánchez-González MN. Metasecretome and biochemical analysis of consortium PM-06 during the degradation of nixtamalized maize pericarp. *Biocatal Agric Biotechnol*. 2023; 48: 102634. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102634>.
7. Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana, NOM 004 SEMARNAT 2002 Protección ambiental. Lodos y



- biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0
8. Ruiz J, Zepeda A, Canul M, Córdova A. Estrategias para la intensificación de la digestión anaerobia de semisólidos. En: Avances y perspectivas de la biotecnología en la península de Yucatán. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería. 2018. Pp. 237-267.
 9. Córdova-Lizama A, Carrera-Figueiras C, Zepeda-Pedreguera A, Ruiz-Espinoza JE. Effects of ultrasonic pretreatment on the solubilization and kinetic study of biogas production from anaerobic digestion of waste activated sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017; 123:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.05.020>.
 10. Vallejo Pat MA. Estudio del efecto del pretratamiento térmico de lodos residuales en la digestión anaerobia y análisis tecno-económico. Facultad de Ingeniería Química, UADY. 2019.
 11. Córdova-Lizama A, Carrera-Figueiras C, Zepeda-Pedreguera A, Ruiz-Espinoza JE. Enhancing the performance and stability of the anaerobic digestion of sewage sludge by zero valent iron nanoparticles dosage. *Bioresource Technology*. 2019; 275:352-359. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.086>.
 12. Córdova-Lizama A, Carrera-Figueiras C, Palacios A, Castro-Olivera P M, Ruiz-Espinoza J. Improving hydrogen production from the anaerobic digestion of waste activated sludge: Effects of cobalt and iron zero valent nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(70):30074-30084. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.187>.
 13. Córdova-Lizama A, Carrera-Figueiras C, Zepeda-Pedreguera A, Ruiz-Espinoza JE. Nanoferrosonication: A novel strategy for intensifying the methanogenic process in sewage sludge. *Bioresource Technology*. 2019; 276:318-324. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.021>.

14. González Nahua FJ. Estudio de hidrocarburos modificados con óxidos de hierro en el mejoramiento de la digestión anaerobia de lodos crudos. Facultad de Ingeniería Química, UADY. 2024.
15. Ordaz A, Sánchez M, Rojas R, Zepeda A. Respiriometric response and microbial succession of nitrifying sludge to m-cresol pulses in a sequencing batch reactor. *Biodegradation*. 2017; 28:81-94. doi: 10.1007/s10532-016-9779-0.
16. Tec-Campos D, Posadas C, Tibocho-Bonilla J D, Thiruppaty D, Glonek N, Zuñiga C, Zepeda A, Zengler K. The genome-scale metabolic model for the purple non-sulfur bacterium *Rhodospseudomonas palustris* Bis A53 accurately predicts phenotypes under chemoheterotrophic, chemoautotrophic, photoheterotrophic, and photoautotrophic growth conditions. *PLoS Computational Biology*. 2023; 19(8):e1011371. doi: 10.1371/journal.pcbi.1011371.
17. Ordaz A, Gil E, Hernández-Martínez GR, Thalasso F, Rincón S, Zepeda A. Microrespirometric assessment of the metal-organic framework [Co₂(btec)(bipy)(DMF)₂]_n ("MOF-Co") to prevent inhibition by arsenic in activated sludge. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2020; 6(4): 1153-1162. doi: 10.1039/c9ew00967a.
18. Gil E, Huang X, Zuo K, Kim J, Rincón S, Rivera J, Ranjbari K, Perreault F, Alvarez P, Zepeda A, Li Q. A polysulfone/cobalt metal-organic framework nanocomposite membrane with enhanced water permeability and fouling resistance. *ACS Applied Polymer Materials*. 2022; 4 (5): 3532-3542. doi: 10.1021/acsapm.2c00132.
19. Carrillo-Cocom L, Juárez-Méndez L, Rincón S, Rivera-Villanueva JM, Nic-Can GI, Zepeda A. Induction of cytotoxic effects and changes in DNA methylation-related gene expression in a human fibroblast cell line by the metal-organic framework [H₂NMe₂]₃ [Tb(III)(2,6 pyridinedicarboxylate)₃] (Tb-MOF). *Environ Sci Pollut Res*. 2023; 30:46685-46696. doi:10.1007/s11356-023-25314-z.