



## La digestión anaerobia de residuos biodegradables como recurso energético y ambiental en el sector agroindustrial cubano

**ENTIDADES EJECUTORAS PRINCIPALES:** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae) y Universidad de Sancti Spíritus José Martí Pérez (UNISS)

**Entidades ejecutoras participantes:** Universidad de Ghent (UGhent), Universidad de Sao Pablo (USP), Universidad de Borås (HB), Universidad Tecnológica de Delft (TUDelft), Instituto de Ciencia Animal (ICA), Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Universidad de La Habana (UH), Universidad de Granma (UDG), Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

**AUTORES PRINCIPALES:** Ileana Pereda Reyes<sup>1</sup>, Osvaldo Romero Romero<sup>2</sup>, Deny Oliva Merencio<sup>1</sup>

**Otros autores:** Jo Dewulf<sup>3</sup>, Marcelo Zaiat<sup>4</sup>, Janet Jiménez Hernández<sup>2</sup>, Jhosané Pagés Díaz<sup>1</sup>, Ernesto Luis Barrera Cardoso<sup>2</sup>, Lisbet Mailín López González<sup>2</sup>, Ilona Sárvári Hórvath<sup>5</sup>, Henri Spanjers<sup>6</sup>, Ania Cabrera Díaz<sup>1</sup>, Aimeé González Suárez<sup>1</sup>, Tania Pérez Pérez<sup>7</sup>, Luz María Contreras Velázquez<sup>2</sup>, Yaniris Lorenzo Acosta<sup>8</sup>, Elena Regla Rosa Domínguez<sup>9</sup>, Gilda Guerra Rivera<sup>10</sup>, Fidel Domenech López<sup>8</sup>, Yans Guardia Puebla<sup>11</sup>, Magnus Lundin<sup>5</sup>, Mohammad Taherzadeh<sup>5</sup>, Han Vervaeren<sup>3</sup>, Ariovaldo J. da Silva<sup>12</sup>, Adalberto Noyola Robles<sup>13</sup>, Juan Manuel Morgan Sagastume<sup>13</sup>, Margarita Elizabeth Cisneros Ortiz<sup>13</sup>

**Colaboradores:** Jörn Budde<sup>14</sup>, Monika Heiermann<sup>14</sup>, Stefan Koehler<sup>1</sup>, Eloisa Pozzi<sup>4</sup>, Steven De Meester<sup>3</sup>, Miguel Ángel Díaz Marrero<sup>1</sup>, Lixis Rojas Sariol<sup>8</sup>, Felipe Eng Sánchez<sup>8</sup>, Gleyce Teixeira Correia<sup>16</sup>, Wu Hong Kwong<sup>16</sup>, Susanne Theuerl<sup>14</sup>, Michael Klocke<sup>14</sup>, Juana M. Chanfón Curbelo<sup>8</sup>, Jan Mumme<sup>14</sup>, Hannelore Schelle<sup>14</sup>, Carlos Rafael Sebrango Rodríguez<sup>2</sup>, Jesús Pérez Olmo<sup>1</sup>, José Luis Sanz Martín<sup>17</sup>, Ann Dumoulin<sup>3</sup>, Jaime Dueñas Moreno<sup>1</sup>, Eliet Véliz Lorenzo<sup>16</sup>, Johan Westman<sup>5</sup>, Kerstin Nielsen<sup>15</sup>, Teresa Suárez Quiñones<sup>14</sup>, Ulrike Schimpf<sup>15</sup>, Kimberly Solon<sup>19</sup>, Youri Amerlinck<sup>3</sup>, Ingmar Nopens<sup>3</sup>, Jo De Vrieze<sup>3</sup>, Nico Boon<sup>3</sup>, Ingo Bergmann<sup>14</sup>, Carlos Luis Menéndez Gutiérrez<sup>1</sup>, Raquel Lebrero Fernández<sup>20</sup>, Edelbis López Dávila<sup>2</sup>, Yenima Martínez Castro<sup>2</sup>, Adele Finco<sup>21</sup>, Maite Urbano Quintero<sup>1</sup>, Ivonne Chávez Fando<sup>1</sup>, Oscar Almazán del Olmo<sup>8</sup>, Yaima Izquierdo González<sup>8</sup>, Mariela Gallardo Capote<sup>8</sup>, Roxana Fernández<sup>8</sup>

**Filiación:** <sup>1</sup>Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), <sup>2</sup>Universidad de Sancti Spíritus José Martí Pérez (UNISS), <sup>3</sup>Universidad de Ghent (UGhent), <sup>4</sup>Universidad de Sao Pablo (USP), <sup>5</sup>Universidad de Borås (HB), <sup>6</sup>Universidad Tecnológica de Delft (TUDelft), <sup>7</sup>Instituto de Ciencia Animal (ICA), <sup>8</sup>Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), <sup>9</sup>Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), <sup>10</sup>Universidad de La Habana (UH), <sup>11</sup>Universidad de Granma (UDG), <sup>12</sup>Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP), <sup>13</sup>Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), <sup>14</sup>Instituto Agrario de Bornim (ATB), <sup>15</sup>Instituto de Proyectos Agrícolas y Urbanos-Ecológicos (IASP), <sup>16</sup>Universidad Federal de San Carlos (UFSCar), <sup>17</sup>Universidad Autónoma de Madrid (UAM), <sup>18</sup>Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), <sup>19</sup>Universidad de Lund (LTH), <sup>20</sup>Universidad de Valladolid (Uva), <sup>21</sup>Universidad Politécnica de la Marche (UNIVPM)

## RESUMEN

### Palabras clave

biodegradabilidad; codigestión; digestión anaerobia; metagenómica; potencial de biogás/metano; pretratamiento termoquímico; residuos agroindustriales; residuos lignocelulósicos

Se describen los resultados alcanzados en el desarrollo y la aplicación de la ingeniería química con aportes de las ciencias biológicas en el tratamiento de residuos biodegradables con alto impacto en distintas áreas de la agroindustria cubana. Los resultados se alcanzan tanto a nivel teórico como práctico en aquellos espacios de la agroindustria cubana donde ha sido posible su aplicación directa. Se muestra cómo la aplicación de las herramientas de biodegradabilidad y determinación de potencial de metano, las técnicas microbiológicas, nuevos pretratamientos y mezclas de residuos (codigestión), así como la modelación y las herramientas estadísticas para la optimización y estimulación de la digestión anaerobia de residuos biodegradables permiten establecer nuevas rutas en la degradación de tales materiales orgánicos. De igual forma se proponen estrategias que logran mayor eficiencia en los procesos de tratamientos ya existentes. Se realiza la proyección de plantas con diferentes casos de estudio a nivel industrial. Todos los resultados permiten la aplicación, consolidación y ampliación de las posibilidades energéticas y bondades ambientales que brinda la digestión anaerobia como recurso de impacto poco explotado en Cuba.

Los mayores desafíos globales actuales involucran al cambio climático, la crisis energética y la seguridad alimentaria. Sectores como el agrícola son considerados entre los de mayor impacto negativo sobre el medioambiente y los recursos naturales, y responsable del 14 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. En este sentido, el empleo de la digestión anaerobia y las diferentes alternativas para su optimización y estimulación es una vía que se ha consolidado por la dualidad de tratamiento de residuos y la generación de energía a partir de dicho tratamiento.

En los últimos años el desarrollo del grupo de trabajo dedicado a la digestión anaerobia de residuos biodegradables de la Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría y de la Universidad José Martí Pérez de Sancti Spíritus ha estado regido por la importancia que este tema tiene desde el punto de vista ambiental y energético para Cuba. El objetivo principal del trabajo se enfoca en mejorar la eficacia y la eficiencia de la digestión anaerobia de los residuos con énfasis en las tendencias y prácticas internacionales, y sus resultados han realizado varios aportes a la ciencia y sus aplicaciones.

Con este fin se ha trabajado en el impacto de los resultados en la agroindustria cubana, generadora de grandes volúmenes de residuos en tres direcciones:

- Impacto en las producciones agropecuarias: digestión anaerobia de residuales arroceros, paja de maíz y residuales porcinos.
- Impacto en la industria azucarera: digestión anaerobia de cachaza y vinaza, y sus mezclas.
- Impacto en la industria alimentaria: digestión anaerobia de residuos de matadero.

En la industria arrocera se han obtenido los siguientes resultados [1-3]:

- Determinación del potencial de biogás de los residuos del arroz cubano utilizados como monosustrato, en condiciones de temperatura mesofílica y termofílica.
- Aplicación de todos los resultados obtenidos en una proyección en la Empresa Sur del Jíbaro, en la Provincia de Sancti Spíritus.

Para la digestión anaerobia de residuos lignocelulósicos se obtuvo [4-7]:

- Evaluación de la especiación de metales aportados por minerales cubanos y su biodisponibilidad en la digestión anaerobia de residuos lignocelulósicos.
- Análisis del efecto estimulante o inhibitorio de minerales cubanos sobre la dinámica de la comunidad microbiana en la digestión anaerobia de residuos lignocelulósicos.

Para la digestión anaerobia de residuales porcinos [8-14]:

- Comportamiento fluidodinámico de un reactor anaerobio EGSB con adición de zeolita.
- Reporte, por primera vez para la ciencia, de 7 secuencias del gen *ARN 16S* de bacterias que participan en la digestión anaerobia de estiércol porcino, la paja de arroz y las arcillas residuales, y dos del gen *ARN 16S* de archaeas, pertenecientes al orden Methanomicrobiales, no relacionadas con las familias descritas.

En el caso de la industria azucarera se alcanzaron los siguientes resultados [15-24]:

- Modificación del modelo ADM1 para la predicción de la digestión anaerobia de las vinazas cubanas.
- Evaluación del impacto ambiental de ciclo de vida y análisis exergético del uso de las vinazas para producir biogás como alternativa a su tratamiento en lagunas.
- Análisis técnico y ambiental para el empleo de urea como fuente de nitrógeno en la fermentación alcohólica a partir de mieles de caña de azúcar. Es una novedad científica al estudiar de forma integral los procesos como una misma tecnología de producción.
- Combinación de reactores anaerobios con posterior ozonización de los efluentes biodigeridos de vinazas. Esto permite alcanzar eficiencias de eliminación de color y turbidez del 94 %. Esta propuesta se reporta por primera vez en la literatura científica.
- Recuperación de potasio de las vinazas y efluentes biodigeridos de las vinazas, mediante zeolitas.
- Evaluación del efecto de los pre-tratamiento termoalcalino y por agua caliente de la cachaza en el porcentaje de solubilización de la DQO y el incremento de su biodegradabilidad en términos de rendimiento de metano.
- Definición de la sinergia en la mezcla vinaza-cachaza sin pre-tratar y del antagonismo en la mezcla vinaza-cachaza pre-tratada sobre la biodegradabilidad de esta en términos de rendimiento de metano.

En la digestión anaerobia de los residuos de matadero los resultados fueron [25-29]:

- Codigestión de los residuos de matadero con diferentes fuentes de sustratos disponibles en mataderos tipos cubanos.
- Reporte por primera vez de la sinergia y el antagonismo de la codigestión de mezclas de residuos lignocelulósicos con residuos de matadero.
- Implementación, por primera vez, del procedimiento de alimentaciones consecutivas para predecir el comportamiento de las mezclas de residuos de matadero en digestión anaerobia a largo plazo.
- Aplicación de los resultados anteriores en una proyección en las empresas Genético Pecuarias Camilo Cienfuegos de Pinar del Río y la Empresa Cárnica de Nueva Paz, en Mayabeque.

A partir de los resultados obtenidos se ha trabajado en coordinación con el Ministerio de la Agricultura y el Grupo Empresarial AZCUBA para la proyección de diferentes plantas de biogás a escala industrial.

En conclusión, se describen algunos de los aportes y resultados alcanzados en la digestión anaerobia de residuos, con énfasis en el desarrollo de nuevas combinaciones de tecnologías, enfoques integrales para la evaluación del impacto de las tecnologías anaerobias, métodos y modelos. Se ha logrado mejorías en eficacia y eficiencia alcanzando aplicaciones en propuestas de plantas de tratamiento y acciones concretas puntuales en sectores de importancia para Cuba.

## Referencias bibliográficas

1. Contreras LM, Schelle H, Sebrango CR, Pereda I. Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process. *Water Science and Technology* 65 (6) (2012).
2. Contreras LM, Mumme J, Pereda I, Romero-Romero O. Tratamiento de la paja de arroz mediante fermentación anaerobio en estado seco. *Revista Ingeniería Química de Uruguay*, 41 (2012).
3. Contreras LM, Mumme J, Pereda I, Romero-Romero O, Martínez-Castro Y, Finco A. Energetic, environmental and economic potentialities of the anaerobic treatment of rice straw for the case of the Cuban enterprise 'Sur del Jibaro'. *International Journal of Global Energy Issues*, 37 (5/6) (2014).
4. González-Suárez A, Nielsen K, Köhler S, Oliva-Merencio D, Pereda-Reyes I. Enhancement of anaerobic digestion of microcrystalline cellulose (MCC) using natural micronutrient sources. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 43, 393-401 (2014).
5. Oliva-Merencio D, Pereda-Reyes I, Schimp U, Koehler S, da Silva AJ. Cellulase effect on anaerobic digestion of maize silage under discontinuous operation. *Engenharia Agrícola*, 35 (5), 951-958 (2015).
6. González-Suárez A, Pereda-Reyes I, Pozzi E, da Silva AJ, Oliva-Merencio D, Zaiat M. Effect of natural mineral on methane production and process stability during semi-continuous mono-digestion of maize straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology, Part A: Enzyme Engineering and Biotechnology*, 78, 1522-1533 (2016).
7. González-Suárez A, Pereda-Reyes I, Oliva-Merencio D, Suárez-Quiriones T, da Silva AJ, Zaiat M. Bioavailability and dosing strategies of mineral in anaerobic mono-digestion of maize straw. *Engineering in Life Sciences*, 18, 562-569 (2018).
8. Jiménez J, Cisneros-Ortiz M, Morgan-Sagastume JM, Guardia-Puebla Y, Noyola A. Optimization of the thermophilic anaerobic co-digestion of pig manure, agriculture waste and inorganic additive through Specific Methanogenic activity. *Water Science & Technology*, 69.12, 2381-2388. DOI: 10.2166/wst.2014.109. (2014).
9. Jiménez J, Guerra-Rivera G, Romero-Romero O, Cisneros-Ortiz M, Morgan-Sagastume JM, Noyola A. Methanogenic activity optimization using the response surface methodology, during the anaerobic co-digestion of agriculture and industrial wastes. *Microbial community diversity. Biomass and Bioenergy*, 71, 84-97 (2014).

10. Jiménez J, Guardia-Puebla Y, Cisneros-Ortiz M, Morgan-Sagastume JM, Guerra-Rivera G, Noyola A. Optimization of the specific methanogenic activity from anaerobic co-digestion of manure and straw, using industrial clay residues as inorganic additive. *Chemical Engineering Journal*, 259, 703-714. DOI: 10.1016/j.cej.2014.08.031. (2015).
11. Jiménez J, Theuerl S, Bergmann I, Klocke M, Guerra G, Romero-Romero O. Prokaryote community dynamics in anaerobic co-digestion of swine manure, rice straw and industrial clay residual. *Water Science & Technology*, 74(4) 824-835 (2016).
12. Jiménez J, Barrera EL, De Vrieze J, Boon N, De Meester S, Spanjers H, Romero-Romero O, Dewulf J. Microbial community dynamics reflect reactor stability during the anaerobic digestion of a very high strength and sulfate-rich vinasse. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(4), 975-984. doi:10.1002/jctb.5449. (2017).
13. Pérez-Pérez T, Teixeira-Correia G, Hong-Kwong W, Pereda-Reyes I, Oliva-Merencio D, Zaiat M. Effects of the support material addition on the hydrodynamic behavior of an anaerobic expanded granular sludge bed reactor. *Journal of Environmental Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2016.02.011>. (2016).
14. Pérez-Pérez T, Pereda-Reyes I, Pozzi E, Oliva-Merencio D, Zaiat M. Performance of an expanded granular sludge bed reactor modified with zeolite. *Water Science & Technology*. doi: 10.2166/wst.2017.516 (2017).
15. Barrera EL, Spanjers H, Dewulf J, Romero O, Rosa E. The sulfur chain in biogas production from sulfate-rich liquid substrates: a review on dynamic modeling with vinasse as model substrate. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 88, 1405-1420 (2013).
16. Barrera EL, Spanjers H, Romero O, Rosa E, Dewulf J. Characterization of the sulfate reduction process in the anaerobic digestion of a very high strength and sulfate rich vinasse. *Chemical Engineering Journal* 248, 383-393 (2014).
17. Barrera EL, Spanjers H, Solon K, Amerlinck Y, Nopens I, Dewulf J. Modeling the anaerobic digestion of cane-molasses vinasse: extension of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) with sulfate reduction for very high strength and sulfate rich wastewater. *Water Research* 71, 42-54 (2015).
18. Barrera EL, Rosa E, Spanjers H, Romero O, De Mester S, Dewulf J. A comparative assessment of anaerobic digestion power plants as alternative to lagoons for vinasse treatment: life cycle assessment and exergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 113, 459-471 (2016).
19. Cabrera-Díaz A, Dueñas-Moreno J, Véliz-Lorenzo E, Díaz-Marrero MA, Menéndez-Gutiérrez CL, Oliva-Merencio D, Pereda-Reyes I, Zaiat M. Anaerobic digestion of vinasses by combining an upflow anaerobic filter reactor and ozonation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33 (4) (2016).
20. Cabrera-Díaz A, Pereda-Reyes I, Oliva-Merencio D, Lebrero R, Zaiat M. Anaerobic Digestion of Sugarcane Vinasse Through a Methanogenic UASB Reactor Followed by a Packed Bed Reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology Part A: Enzyme Engineering and Biotechnology*. DOI 10.1007/s12010-017-2488-2 (2017).
21. López-González LM, Vervaeren H, Pereda-Reyes I, Dumoulin A., Romero-Romero O, Dewulf J. Thermo-chemical pre-treatment to solubilize and improve anaerobic biodegradability of press mud. *Bioresource Technology*, 131, 250-257 (2013).
22. López González LM, Pereda-Reyes I, Dewulf J, Budde J, Heiermann M, Vervaeren H. Effect of liquid hot water pre-treatment on sugarcane press mud methane yield. *Bioresource Technology*, 169, 284-290 (2014).
23. López-González LM, Pereda-Reyes I, Romero-Romero O, Budde J, Heiermann M, Vervaeren H. Antagonistic effects on methane yield of liquid hot-water pretreated press mud fractions codigested with vinasse. *Energy & Fuels*, 29 (11), 7284-7289 (2015).
24. López-González LM, Pereda-Reyes I, Romero-Romero O. Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Waste Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.016> (2017).
25. Pagés-Díaz J, Pereda-Reyes I, Lundin M and Sárvári Horváth I, Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities: Kinetics evaluation and synergistic effects. *Bioresource Technology* 102 (23), (2011).
26. Pagés-Díaz J, Sárvári Horváth I, Pérez Olmo J, Pereda-Reyes I, Co-digestion of bovine slaughterhouse wastes, cow manure, various crops and municipal solid waste at thermophilic conditions: a comparison with specific case running at mesophilic conditions. *Water Science and Technology*, 67, 989-995 (2013).
27. Pagés-Díaz J, Pereda-Reyes I, Taherzadeh MJ, Sárvári-Horváth I. Anaerobic codigestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. *Chemical Engineering Journal*, 245, 89-98 (2014).
28. Pagés-Díaz J, Westman J, Taherzadeh MJ, Pereda-Reyes I, Sárvári-Horváth I. Semi-continuous co-digestion of solid cattle slaughterhouse waste with other waste streams: interactions within the mixtures and methanogenic community structure. *Chemical Engineering Journal*, 273, 28-36 (2015).
29. Pagés-Díaz J, Pereda-Reyes I, Sanz JL, Lundin M, Taherzadeh MJ, Sárvári-Horváth I. A comparison of process performance during the anaerobic mono- and co-digestion of slaughterhouse waste through different operational modes. *Journal of Environmental Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.004>, (2017).

## AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA

**Ileana Pereda Reyes.** Blanco 10106 int. e/ Ave 101 y Línea. Cotorro, La Habana. Correo electrónico: [ileana@quimica.cujae.edu.cu](mailto:ileana@quimica.cujae.edu.cu)