

La Digestión Anaerobia Corazón Tecnológico de la Economía Circular

Dr. Sergio Esteban Viguera Carmona^a, Mtra. María Monserrat Montes García^b
Dr. Juan Antonio Yáñez Varela^b, Dra. Alejandra Velasco Pérez^c,
Dr. José Guadalupe Vian Pérez^d y Dr. Héctor Fernando Puebla Núñez



Resumen

La economía circular es un modelo de producción y consumo, que implica compartir, arrendar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes, durante el mayor tiempo posible, ya que de esta forma se alarga el ciclo de vida de los productos, y en la práctica, implica reducir el desperdicio al mínimo. Cuando un producto llega al final de su vida, sus materiales se mantienen dentro de la economía, siempre que sea posible, gracias al reciclaje, pudiendo utilizarlos productivamente una y otra vez, para crear así más valor.

Avanzar hacia una economía circular podría generar oportunidades, incluida la reducción de las presiones sobre el ambiente, mayor seguridad en el suministro

Acerca de los autores

¹Estudiante del Programa de Maestría de Ingeniería en Sistemas Computacionales TecNM-Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

^{2, 3, 4, 5} Docente-Investigador del TecNM-Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec- Laboratorio Nacional CONAHCyT en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos.



de materias primas, mayor competitividad, innovación, crecimiento y empleo. Sin embargo, el cambio también plantea desafíos como el financiamiento, facilitadores económicos clave, habilidades, modificación del comportamiento del consumidor y en los modelos de negocio, así como gobernanza multinivel.

En general, la sociedad está lista para implementar los ajustes necesarios para emprender el camino hacia una economía circular, pero los gobiernos están lejos de entender que el cambio es inminente, no obstante que la sociedad siempre ha presionado para que se den las transformaciones que generen una mejor calidad de vida. La inversión, el cambio de paradigmas y el conflicto de intereses, son los principales retos que todos los gobiernos del mundo deberán afrontar en el corto plazo.

Este artículo tiene el objetivo de mostrar cómo la economía circular ya está en acción en varios lugares del mundo y que la metamorfosis lograda durante su implementación, alienta a que el cambio hacia la economía circular sea el punto de partida a una verdadera sustentabilidad mundial. De igual forma, se

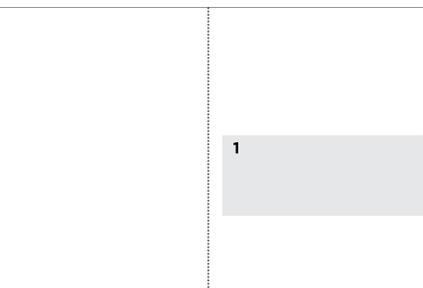
muestra que la digestión anaerobia es el corazón tecnológico de la economía circular, ya que ésta es el punto de partida para la revalorización de muchos de los residuos sólidos orgánicos. Es por ello, que los proyectos que se desarrollan en el laboratorio de Tecnología Anaerobia del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, están ligados al modelo económico que va a regir la economía mundial en el corto plazo.

Introducción

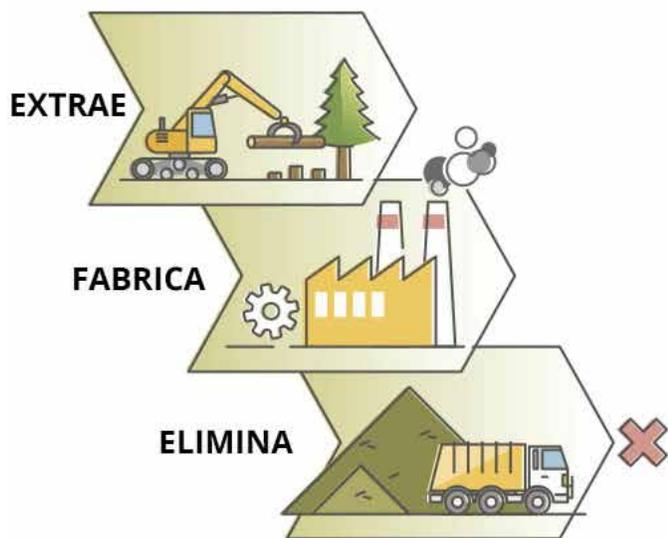
Durante el siglo pasado, la sociedad creció siguiendo un paradigma lineal de extracción de recursos en diversos puntos del planeta para transformarlos, explotarlos y, en la mayoría de los casos, arrojar residuos en otros lugares del mundo, lo que resultó en una desconexión total dentro de los ciclos naturales de la materia orgánica e inorgánica. Las cadenas de valor modernas a menudo se dividen en áreas separadas entre extracción, producción, consumo y desperdicio, lo que no facilita los enfoques de ciclo de vida y las bioeconomías circulares (Bakan *et al.*, 2021). La economía circular es un paradigma que tiene como objetivo generar prosperidad económica, proteger el medio ambiente y prevenir la contaminación, facilitando así el desarrollo sostenible (Prieto *et. al.*, 2017).

Según las últimas estimaciones de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), de todos los alimentos producidos, aproximadamente un tercio terminan como residuos (subproductos y desechos), lo que equivale a alrededor de 1,300 millones de toneladas cada año en todo el mundo. Al mismo tiempo, según cifras del Banco Mundial , en el 2016 las ciudades del mundo generaron 2,010 millones de toneladas de residuos al año, y para el 2050 se espera que llegue a 3,400 millones de toneladas, la mitad de las cuales serán orgánicas (Gustavsson, 2017).

El patrón globalizado de uso intensivo de recursos, traza una trayectoria hacia el agotamiento casi total, con daños e impactos “colaterales”, que incluyen el cambio climático, la contaminación del agua, el aire y el suelo, la pérdida



ECONOMÍA LINEAL



ECONOMÍA CIRCULAR



de biodiversidad y, en última instancia, amenazan la salud y la estabilidad geopolítica del planeta. En tanto que, en la práctica, una economía circular implica reducir los residuos al mínimo. Cuando un producto llega al final de su vida, sus materiales se mantienen dentro de la economía siempre que sea posible, los cuales se pueden utilizar productivamente una y otra vez, creando así más valor. Las medidas que conducen a una economía circular, incluyen la reutilización, reparación, renovación y reciclaje de materiales y productos existentes. Lo que antes se consideraba “residuo” puede convertirse en un recurso valioso.

Tecnología de conversión de residuos a energía

La gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) se ha convertido probablemente en el problema más urgente que enfrentan muchos gobiernos en la actualidad. La jerarquía de la gestión de los residuos a menudo proporciona directrices generales para seleccionar los métodos, basados en su solidez con respecto a la sostenibilidad.

La jerarquización de la disposición de los residuos se puede describir como una pirámide invertida, en donde la punta representa la tecnología menos adecuada, como se puede apreciar en la Figura 1 (Tsui y Wong, 2019); conforme se va ensanchando la pirámide, la tecnología va teniendo mayores beneficios, y así progresivamente, rumbo a la sustentabilidad. La idea de “sostenibilidad” es el núcleo de la estrategia de gestión de RSU de cualquier país, con el objetivo primordial de reducir las posibles cargas ambientales para las generaciones futuras. La implementación exitosa de una gestión de los RSU más sostenible, permitirá un mejor ciclo cerrado de reciclaje de materiales, un mayor suministro de energía renovable, así como la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas naturales.

El relleno sanitario ha sido durante mucho tiempo el método más popular y lo sigue siendo en muchas naciones de todo el mundo. El relleno sanitario se

2	3

<https://www.csrconsulting.com.mx/2022/10/03/economia-circular/>

<https://www.wastecero.com/economia-circular-vs-economia-lineal-comprendiendo-el-futuro-sostenible/>

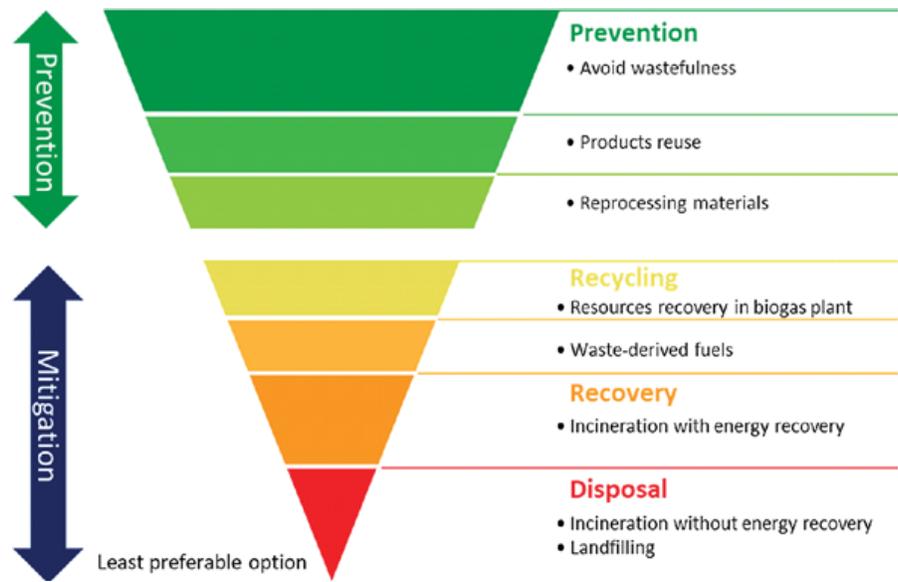


Figura 1

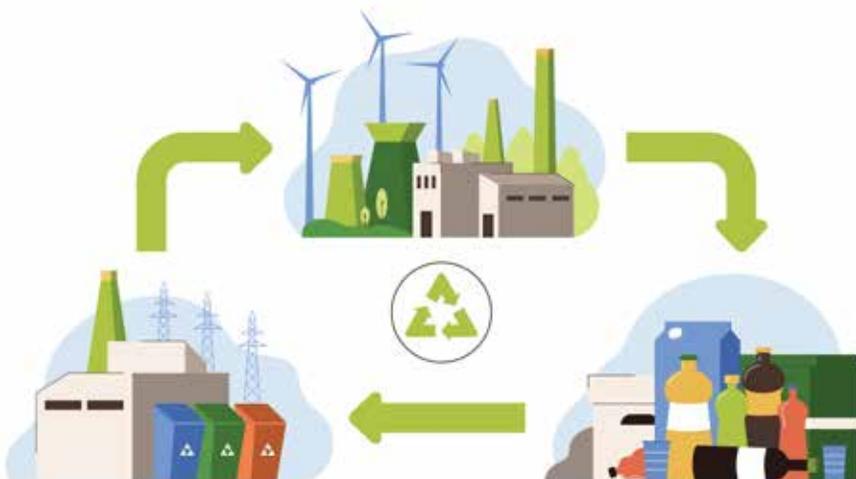
Descripción general de la jerarquía de residuos (Tsui y Wong, 2019).

puede considerarse como un método para la eliminación de los residuos en un sitio con la infraestructura necesaria, atendiendo a la recuperación de biogás y al tratamiento adecuado de los lixiviados. El lixiviado de los vertederos, consiste en sustancias concentradas y recalcitrantes, que pueden contaminar seriamente las superficies y los acuíferos subterráneos cercanos. Estas características hacen que el relleno sanitario se encuentre en la punta de la pirámide, junto con la incineración sin recuperación de energía, clasificándolas meramente como tecnologías de disposición.

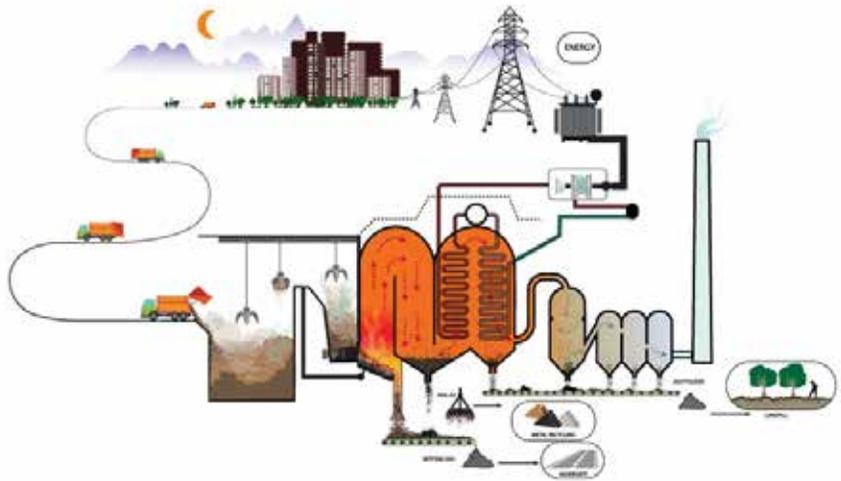
La incineración con recuperación de energía

La transformación de residuos en energía, denominada internacionalmente como WtE (Waste-to-Energy, por sus siglas en inglés) se asocia principalmente con cualquier técnica de incineración que comprenda la generación de electricidad, calor o combustible a partir de los residuos. La incineración

WtE se ha adoptado ampliamente en muchos países desarrollados y en desarrollo, convirtiéndose en una opción tecnológica madura para la gestión de RSU. Sin embargo, es cuestionable su efecto sobre la gestión sostenible de residuos, siendo mucho más favorecidos los enfoques de reciclaje. Además, debido a la posible liberación de sustancias tóxicas y gases de efecto invernadero durante la combustión, a menudo provoca oposición social o fobia del público en general, lo que la hace políticamente menos atractiva, colocándola en el segundo piso de la pirámide, pero ya considerada como una tecnología de recuperación de energía.



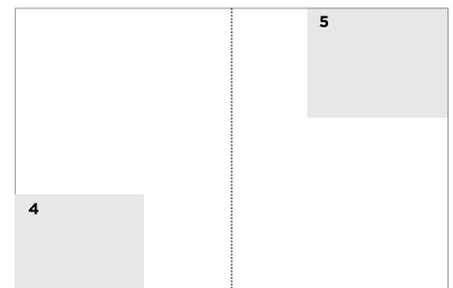
Las tecnologías WtE cubren tradicionalmente todas las técnicas de procesamiento térmico para generar calor o combustible gas/petróleo a partir de RSU. La incineración WtE es la técnica más ampliamente aplicada, en comparación con otras tecnologías térmicas WtE (incluida la pirólisis, la gasificación y la torrefacción), que se llevan a cabo a una temperatura significativamente más baja y en un entorno con menos oxígeno, lo que implica diferentes reacciones y rendimientos de producto. Una ventaja de la incineración, es la destrucción eficiente de todas las bacterias, virus y productos farmacéuticos en los RSU, evitando que estos elementos ingresen al medio natural. Sin embargo, las cenizas de fondo sólo pueden sustituir entre el 1 y 2% de los principales recursos de grava como máximo. Además, la mineralización completa de la fracción orgánica en los RSU da como resultado la pérdida de elementos (especialmente fósforo) en los ciclos de nutrientes globales. En términos ambientales, se sabe que las cenizas volátiles son peligrosas, aunque los últimos avances implican la extracción de zinc, hierro y cobre, mediante técnicas de extracción química húmeda o electrólisis, o ambas. No obstante, aún se requiere evaluar más a fondo si las situaciones económicas y ambientales reales pueden beneficiarse de estas nuevas tecnologías, especialmente en aplicaciones a gran escala.



La digestión anaerobia como tecnología de reciclaje de materiales

El reciclaje sostenible de materiales, es la base de los principios de la economía circular, en donde los materiales se retienen el mayor tiempo posible en ciclos integrados de circulación de residuos. Para lograr esto, un sistema de clasificación adecuado para la separación de residuos es una tarea de primordial importancia, y luego viene la aplicación de tecnologías ambientales sustentables. La separación de los residuos es complicada, ya que la población en general ve estos como basura, no les da valor económico y aunque empieza a otorgarles un valor social, lo que puede ayudar a la tarea de clasificación de los residuos *in situ*, todavía el camino está poco andado. La clasificación puede expresarse de varias formas, y un enfoque general incluye: residuos biodegradables, materiales reciclables, residuos inertes, residuos eléctricos y electrónicos, residuos peligrosos, residuos tóxicos, y residuos biomédicos.

La bioeconomía considera los residuos orgánicos como materia prima, transformándolos en productos útiles, al igual que el petróleo crudo se utiliza como materia prima para la producción química. La biorrefinería de desechos aprovecha una serie de procesos de conversión de biomasa y técnicas de ingeniería de procesos para producir biocombustibles y químicos de valor agregado a partir de desechos orgánicos (biogénico: producido por organismos vivos).



<https://gestiondelamianto.com/economia-circular/>

<https://systems.carmeuse.com/es/industries/waste-to-energy-process/>

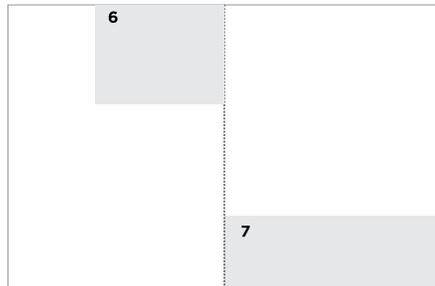


La bioeconomía tiene actualmente un tamaño de mercado de más de 2 billones de euros y contribuye a más de 22 millones de puestos de trabajo (alrededor del 9% de la fuerza laboral total de la Unión Europea (EU) en diversos sectores, incluidos la agricultura, el tratamiento de residuos, la silvicultura, la alimentación y producción de productos químicos (Tsui y Wong, 2019).

Las biorrefinerías se encuentran en el medio de la pirámide, ya que no solo recuperan energía, sino que también reciclan materiales, sin embargo, aún se encuentran en la sección de la mitigación en dicha pirámide, pero ya coqueteando con conceptos como el reúso, reprocesamiento y la minimización del uso de materiales, estos dos últimos conceptos considerados en la parte alta de la pirámide en donde el concepto general es la prevención.

Las técnicas actuales de biorrefinería de desechos, involucran principalmente tecnología de conversión simple y “productos químicos primarios” o se pueden generar compuestos químicos intermedios o industriales a partir de desechos orgánicos utilizando enfoques biológicos relativamente simples, como ya se han establecido. Para brindar más posibilidades a la producción de elementos de valor agregado y la generación de energía, la valorización de residuos requiere combinar tecnologías de conversión en un enfoque integrado para reducir los costos generales.

Las biorrefinerías de desechos se caracterizan por crear productos de alto valor agregado y bajo volumen de producción o de bajo valor agregado y de alto volumen de producción, a partir de desechos biogénicos. Por ejemplo, la digestión anaerobia (DA) tiene un potencial reconocido para contribuir a la obtención de altos volúmenes de biogás.



https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/digestio_anaerobia/

<https://thefoodtech.com/tecnologia-de-los-alimentos/tecnologia-de-digestion-anaerobia-permite-una-gestion-de-residuos-mas-eficiente/>

La utilización directa de RSU heterogéneos, es poco común e inapropiada para el biorrefinado. Por lo tanto, siguiendo la idea de la economía circular, está claro que el desarrollo de estructuras de recogida selectiva y capacidad de reciclaje, debe ser una prioridad absoluta. Desde la perspectiva tecnológica, sin una clasificación adecuada de los residuos, los costos de separación de sustancias pueden trascender fácilmente el valor de los bioproductos finales.

La digestión anaerobia (DA) es el corazón de las tecnologías sustentables de gestión de residuos. La multifuncionalidad de la DA es su fortaleza más clara, basada en principios de sustentabilidad con conexiones a muchas tecnologías innovadoras de refinería de desechos y agricultura sustentable, para resolver los desafíos de los desechos y el reciclaje global de nutrientes. Al ser la tecnología más madura en biorrefinería de residuos, está claro que las plantas de DA están siendo el centro de muchas rutas posibles de recuperación de recursos en la bioeconomía.

Se ha demostrado que la digestión anaerobia (DA) puede generar de dos a cuatro veces más rendimiento de metano por tonelada de RSU en tres días que en siete años en un relleno sanitario. Con la tecnología existente, un m³ de biogás se puede convertir en 6.7 kW h de energía (Tsui y Wong, 2019). En un estudio de caso, Drofenik *et al.*, (2023) diseñaron un sistema pequeño, que pudiera operar con una unidad combinada de calor y energía (CHP) comercial. Se calculó que la unidad CHP tiene un rendimiento de biogás de 109 m³/día a una potencia de 24.1 kW, lo que requiere 740 kg de desperdicios de alimentos por día. El calor generado podría sustituir el 5% del gas natural utilizado para calentar agua sanitaria. El periodo de recuperación de la inversión, sería de 7.2 años, a un precio de calefacción de aproximadamente 80 EUR/MW·h; sin embargo, para los municipios con más de 40,000 habitantes, el tiempo de recuperación se reduciría a menos de tres años. El coste del calor generado por este sistema sería de unos 25 EUR/MW·h, teniendo en cuenta la subvención gubernamental para el funcionamiento de la unidad CHP.

En términos de ciclo de materiales, la DA facilita una separación: sólido/líquido de desechos orgánicos, dando salida al digestato sólido y líquido.



El digestato sólido se puede utilizar como abono y proporciona el mismo valor que los acondicionadores orgánicos aplicados como mejoradores del suelo, lo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos, mejora la retención de humedad del suelo y reduce los requisitos de riego. Además, el valor y el alcance de las aplicaciones del biogás se pueden mejorar en gran medida eliminando el dióxido de carbono y otros gases contaminantes para proporcionar biometano de alta calidad, como sustituto del gas natural en diversos usos industriales y domésticos.

Conclusiones

La DA es el corazón de las tecnologías sustentables de gestión de residuos, así como la incineración WtE es el centro de las tecnologías WtE. La DA y la incineración WtE son dos tecnologías maduras que por sí solas están gestionando muchos de los residuos que se generan en la actualidad.

Por el momento el reciclaje como tecnología es insuficiente para gestionar los crecientes volúmenes de RSU y, como resultado, el mundo no puede darse el lujo de abandonar la incineración por ahora, pero es evidente que se debe dar un cambio acelerado hacia la incineración WtE y emigrar también de manera sostenida hacia la gestión de residuos en biorrefinerías; el camino ya se ha empezado a andar y seguramente para el año 2050 habremos implementado las tecnologías sustentables necesarias para poder seguir habitando nuestro planeta. Estamos en un punto sin retorno, por lo que no podemos desviar la ruta, porque si lo hacemos, estaremos enfrentando para esos años un panorama catastrófico desde el punto de vista ambiental, económico y social.

Referencias

Bakan B., Bernet N., Bouchez T., Boutrou R., Choubert J-M., Dabert P., Duquennoi C., Ferraro V., García-Bernet D. Gillot S., Mery J., Rémond C., Steyer J-P., Trably E. Tremier A. (2021). "Circular Economy Applied to Organic Residues and Wastewater: Research Challenges." *Waste and Biomass Valorization* doi.org/10.1007/s12649-021-01549-0.

Drofenik Jan, Urbancl Danijela Goričanec, Darko, Kravanja Zdravko, Novak Pintarič Zorka. (2023). "Food Waste to Energy through Innovative Coupling of CHP and Heat Pump. *Energies*", 16, 3344. <https://doi.org/10.3390/en16083344>

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., Meybeck A. (2011). *Global food losses and food waste. Extent, causes and prevention*. FAO, Rome.

Prieto-Sandoval V., Jaca C., Ormazabal M. (2017). "Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación." *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 15: 85-95

Tsui To-Hung, Wong Jonathan W. C. (2019). "A critical review: emerging bioeconomy and waste to energy technologies for sustainable municipal solid waste management". *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1:151-167 <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00013-z>

Fotografías

<https://www.cincovientos.com/la-economia-circular/>

<https://www.csrconsulting.com.mx/2022/10/03/economia-circular/>

<https://www.wastecero.com/economia-circular-vs-economia-lineal-comprendiendo-el-futuro-sostenible/>

<https://gestiondelamianto.com/economia-circular/>

<https://systems.carmeuse.com/es/industries/waste-to-energy-process/>

https://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/tractament_biologic/digestio_anaerobia/

<https://thefoodtech.com/tecnologia-de-los-alimentos/tecnologia-de-digestion-anaerobia-permite-una-gestion-de-residuos-mas-eficiente/>