

TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS PARA SU REUTILIZACIÓN O PRODUCCIÓN DE BIOENERGÉTICOS³¹⁷

SOLID WASTE TREATMENT TECHNOLOGIES FOR ITS REUSE OR PRODUCTION OF BIOENERGETICS

Israel Barrutia Barreto³¹⁸

Renzo Seminario Córdova³¹⁹

José Lisbinio Cruz Guimaraes³²⁰

Vanessa Martínez Rojas³²¹

Pares evaluadores: Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad –REDIEES.³²²

³¹⁷ Derivado del proyecto de investigación: Tecnologías Limpias.

³¹⁸ Licenciado en administración de cooperativas, Universidad Nacional Federico Villareal, Doctor en Administración, Pontificia Universidad Católica del Perú, Ocupación (Gerente general), Innova Scientific, correo electrónico: ibarrutia2021@gmail.com

³¹⁹ Biólogo, Universidad Nacional de Piura, Magister en biodiversidad, paisaje y gestión sostenible, Universidad de Navarra, Ocupación (Gerente de Innovación y desarrollo), Innova Scientific, correo electrónico: rseminario@alumni.unav.es

³²⁰ Licenciado en Educación, Universidad Particular de Iquitos, Magister en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana Iquitos, Ocupación (Docente), Universidad Científica del Perú, correo electrónico: cruzguimaraesj@gmail.com

³²¹ Licenciada en física, Universidad Nacional de Ingeniería, Maestra en Ciencias con mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética, Universidad Nacional de Ingeniería, Ocupación (Docente), Universidad Tecnológica del Perú, C21985@utp.edu.pe

³²² Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES. www.rediees.org

31. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS PARA SU REUTILIZACIÓN O PRODUCCIÓN DE BIOENERGÉTICOS³²³

Israel Barrutia Barreto³²⁴, Renzo Seminario Córdova³²⁵, José Lisbinio Cruz Guimaraes³²⁶,
Vanessa Martínez Rojas³²⁷

RESUMEN

Actualmente existe mucha preocupación por la salubridad humana y el ecosistema, debido a la inadecuada administración de residuos sólidos que se viene generando desde hace varias décadas, como consecuencia, enfermedades, inundaciones y mares contaminados son algunas de las tantas situaciones por no tratar nuestros desperdicios adecuadamente, provocando un impacto devastador al planeta y en consecuencia a nosotros mismos. Este capítulo de libro describe los conceptos de residuos sólidos y su clasificación, así también aborda las tecnologías de tratamiento para su disposición, entre ellos se describen los tratamientos biológicos y tratamientos térmicos más usados; también se muestran algunos casos donde se vienen aplicando estas tecnologías en Perú, para su reutilización o producción de bioenergéticos. Cabe resaltar, que la administración de residuos sólidos requiere más atención en el país y en el mundo, puesto que su inadecuada gestión puede generar graves problemas a la salud; y además es necesario actuar y promover una conciencia ambiental para disminuir la generación de residuos sólidos, partiendo desde casa, ya que es uno de los mayores generadores de residuos sólidos. Como conclusión, se recomienda manejar un sistema integral de gestión de residuos sólidos que incorpore reducción de generación de residuos, recolección, segregación y transporte adecuado a su correspondiente centro de

³²³ Derivado del proyecto de investigación: Tecnologías Limpias.

³²⁴ Licenciado en administración de cooperativas, Universidad Nacional Federico Villareal, Doctor en Administración, Pontificia Universidad Católica del Perú, Ocupación (Gerente general), Innova Scientific, correo electrónico: ibarrutia2021@gmail.com

³²⁵ Biólogo, Universidad Nacional de Piura, Magister en biodiversidad, paisaje y gestión sostenible, Universidad de Navarra, Ocupación (Gerente de Innovación y desarrollo), Innova Scientific, correo electrónico: rseminario@alumni.unav.es

³²⁶ Licenciado en Educación, Universidad Particular de Iquitos, Magister en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Ocupación (Docente), Universidad Científica del Perú, correo electrónico: cruzguimaraesj@gmail.com

³²⁷ Licenciada en física, Universidad Nacional de Ingeniería, Maestra en Ciencias con mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética, Universidad Nacional de Ingeniería, Ocupación (Docente), Universidad Tecnológica del Perú, C21985@utp.edu.pe

reciclaje; y además que se aproveche o valore la parte residual, por ejemplo, para los residuos biodegradables se pueden obtener fertilizantes o bioenergéticos.

ABSTRACT

Currently there is much concern about human health and the ecosystem, due to the inadequate management of solid waste that has been generated for several decades, as a result, diseases, floods and polluted seas are some of the many situations for not treating our waste properly, causing a devastating impact to the planet and consequently to ourselves. This book chapter describes the concepts of solid waste and its classification, as well as the treatment technologies for its disposal, including the most used biological and thermal treatments; it also shows some cases where these technologies are being applied in Peru, for its reuse or production of bioenergetics. It should be noted that solid waste management requires more attention in the country and in the world, since its inadequate management can generate serious health problems; it is also necessary to act and promote environmental awareness to reduce the generation of solid waste, starting at home, since it is one of the largest generators of solid waste. In conclusion, it is recommended to manage an integral solid waste management system that incorporates waste generation reduction, collection, segregation and adequate transportation to the corresponding recycling center; and also, that the residual part is used or valorized, for example, for biodegradable waste, fertilizers or bioenergetics can be obtained.

PALABRAS CLAVE: Gestión de residuos sólidos, Bioenergéticos, Biogás, Biol, Compost.

Keywords: Solid waste management, Bioenergetics, Biogas, Biol, Compost.

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos atañe a todas las habitantes del planeta, ya sea que las personas gestionen sus propios residuos o que las naciones proporcionen servicios de gestión de residuos a sus ciudadanos. En tanto que los gobiernos y las ciudades se urbanizan, se despliegan económicamente y se expanden en términos de población, no obstante, el mundo se está precipitando hacia la urbanización, lo que conlleva a que el volumen de residuos sólidos aumente más rápido que la tasa de urbanización, desafiando severamente los sistemas de gestión ambiental y de salud pública. Según estimaciones del Banco Mundial, la generación de residuos aumentará de 2,01 billones de toneladas actuales a 3,40 billones de toneladas para el 2050, y al menos el 33 % de estos residuos se gestionan mal a nivel mundial a través de vertederos abiertos o quema (The World Bank, 2021).

En Perú, la administración de los RS no es apropiada, y se ha convertido en una de los principales causantes de polución del agua, aire, suelo y de enfermedades epidémicas como el cólera. En Lima Metropolitana los residuos sólidos controlados en rellenos sanitarios alcanzaron en el 2019 los 3,65 millones de toneladas (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2020), y cerca de 1,5 millones de residuos sin disposición controlada. Esta situación puede generar diversas enfermedades y problemas al ecosistema, ya que mucha cantidad de estos desechos, sin disposición final formal, son vaciados en los lechos de ríos e incluso en los centros poblados contaminando el aire, el agua y los suelos (Carpio, Fuentes, Prado, & Sánchez, 2008).

Para minimizar el efecto adverso y el aumento de volumen de residuos sólidos, es muy necesario su gestión adecuada; el proceso de gestión de residuos sólidos incluye varias acciones relacionadas con la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y disposición de residuos sólidos. La generación de residuos sólidos y su manejo dependen de los ingresos nacionales y las políticas legales de la nación. Además, para el tratamiento de residuos se necesitan ubicaciones adecuadas que gradualmente son más difíciles de encontrar debido a una actitud de rechazo en diversas comunidades (Banerjee et al., 2019). Asimismo, la economía circular, que se centra en la reutilización y el reciclaje de materiales en ciclos técnicos y biológicos para reducir la

generación de residuos es bastante recomendable e incluso necesaria (Venkata Mohan, Amulya, & Annie Modestra, 2020).

DESARROLLO

En esta sección se describirá el marco teórico, dentro del cual están mencionados el concepto de residuos sólidos y los tipos de RS que existen, así como los tratamientos implementados para su gestión. Además, se mencionan algunos casos de tratamientos que se vienen realizando en el país.

1. Marco teórico

A continuación, se presentan nociones y temas relacionados con RS, tales como su definición, clasificación y gestión.

1.1. Residuos sólidos

La ley de gestión integral de residuos sólidos, ley N° 1278, señala que los RS comprenden todo residuo o desecho en fase sólida o semisólida. Además, se consideran desechos aquellos que siendo líquido o gas se encuentran contenidos en depósitos o envases que van a ser descartados, así también los líquidos o gases, que por sus propiedades fisicoquímicas no puedan ser introducidos en los sistemas de tratamiento de emisiones y efluentes y, por tanto, no pueden ser vertidos al ambiente. En estos casos los gases o líquidos deben ser adaptados de modo seguro para su idónea disposición final (El Peruano, 2017).

1.2. Tipos de residuos sólidos

Los residuos sólidos (RS) consisten principalmente de materiales orgánicos, papel, plástico, vidrio, metales y otros desechos recolectados por las autoridades municipales, principalmente de hogares, oficinas, instituciones y establecimientos comerciales. Para el manejo de RS, una adecuada fracción de orgánicos, contenido de humedad, composición física y valores caloríficos son importantes factores que necesitan ser calculados en todo cambio de fase de los residuos por regulaciones (Moharir & Kumar, 2021). Algunas de las mayores fracciones son descritas a continuación.

Además, los RS tienen potencial como materia prima para producción de etanol, que se aplica en diversos países, y varios estudios de investigación están en proceso de explorar varias opciones de reutilización de RS.

Residuos sólidos municipales

Es la fracción de residuos de mayor generación de viviendas y negocios. Estos residuos son colectados por la municipalidad o cuerpos locales y empresas privadas, que además tienen la responsabilidad de recolectar residuos. Es una fracción enorme de composición de residuos. Estos residuos son heterogéneos en naturaleza y principalmente contienen residuos de comida. Además, pueden contener plásticos, papel, madera, vidrio, cuero, caucho, metales; y residuos peligrosos como baterías desechadas que contienen mercurio, (Moharir & Kumar, 2021).

Residuos de construcción y demolición

Este tipo de residuos principalmente creados durante la construcción, demolición, renovación, haciendo caminos, puentes, etc. Los residuos de construcción y demolición (C&D) es principalmente compuesto de material inerte como el ladrillo, concreto, metales, y madera, tales como fracciones de residuos pueden ser reciclados y utilizados. Materia particulada y asbestos vienen bajo la categoría de residuos peligrosos (C&D). Una cuantificación apropiada es necesaria antes de usarla, antes de usar algunos de los componentes en campo (Moharir & Kumar, 2021).

Residuos electrónicos

El término residuos electrónicos incluye dispositivos eléctricos o electrónicos completos que se descartan, sobran, se vuelven obsoletos o se rompen al final de su vida útil. Junto con el rápido crecimiento del cambio de nueva tecnología con el estilo de vida, la vida productiva de la tecnología anterior se reduce y se vuelve obsoleta. Estos productos obsoletos están enriqueciendo la basura electrónica día a día (Banerjee et al., 2019). Además, estos residuos están compuestos por metales, contaminantes peligrosos y materiales diversos en los que están presentes en mayor medida metales pesados. Dicha concentración de metales pesados en estos residuos los hace peligrosos cuando los arrojan y se convierten en materia de grave preocupación desde un punto de vista ambiental. Por ello, el reciclaje o reutilización

de este tipo de residuos se ha vuelto necesario y algunos de estos componentes como plásticos, vidrios y otras partes útiles pueden ser recicladas (Moharir & Kumar, 2021).

Residuos biomédicos

Este tipo de residuos es generado principalmente por instalaciones médicas tales como centros de salud, hospitales y clínicas. Estos residuos están incrementando debido a causas como el incremento de la población, aumento de enfermedades, patrones de estilos de vida y mayores posibilidades de instalaciones médicas. El uso de accesorios médicos desechables, como jeringas, algodón, guantes, vendas, residuos patológicos, plásticos y químicos, pueden ser altamente infecciosos y, por tanto, este tipo de residuos debe ser dispuesto apropiadamente para evitar algún impacto adverso en los usuarios si ellos tuviesen algún contacto accidentalmente con ellos. Así que antes de un tratamiento es necesario una disposición previa (Banerjee et al., 2019).

1.3. Gestión de los residuos sólidos

La gestión o administración de RS abarca diversas actividades que abarcan la reducción, la recolección, la segregación, el transporte, el tratamiento y la disposición con distintos niveles de sofisticación. En la tabla 1 se indican las propuestas y características de cada proceso.

La industria tuvo sus orígenes en la eliminación de residuos utilizando métodos simples como el vertido terrestre local (vertedero o relleno), el vertido en aguas dulces y marinas y la quema incontrolada, ninguno de los cuales ofrece soluciones de gestión de residuos seguras para la salud y libres de peligro. Históricamente, la eliminación se presentó como una forma de tratamiento sobre la base de que, después de la eliminación, las características de los desechos depositados cambiaban con frecuencia como resultado de la degradación, un fenómeno que aumenta enormemente el potencial contaminante de muchos desechos. El principal objetivo del tratamiento de residuos es la estabilización, preferiblemente por degradación acelerada, de modo que los residuos finales producidos no sean nocivos e incapaces de cambiar más, es decir, estén completamente mineralizados o puedan entrar fácilmente en los diversos biogeoquímicos naturales (elementales), ciclos que gobiernan el ciclo de los materiales en el medio ambiente, sin causar distorsión en ningún ciclo relativo a otro (Hamer, 2003).

Tabla 1. Descripción general de la gestión de residuos sólidos municipales

Proceso	Propuesta	Características
Generación	Generación de residuos sólidos en hogares o comercios y clasificación de residuos	Gran cantidad de alimentos, residuos orgánicos y bienes domésticos
Recolección	Recolección de residuos de los hogares o los comercios	Gran cantidad de alimentos y residuos orgánicos, bienes domésticos y árboles caídos
Transporte	Transporte de residuos locales de los hogares o comerciales a los vertederos regionales de eliminación regional	Gran cantidad de alimentos y residuos orgánicos, bienes domésticos y árboles caídos
Recuperación	Las instalaciones, el equipo y las técnicas empleadas para rescatar materiales reciclables o reutilizables	Recuperación de varios residuos reciclables
Disposición	Eliminación sistemática de residuos materiales en lugares como vertederos, establecimientos de conversión de residuos en energía e instalaciones de incineración	Sistema de tratamiento y generación de lixiviados

Fuente: Tomado de Chelliapan et al. (2020)

2. Tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos y la producción de bioenergéticos

Las tecnologías de tratamiento se refieren a los procesos, métodos o técnicas que pueden cambiar las propiedades físicas, químicas o biológicas de los RS, con el objetivo de disminuir o eliminar su potencial peligro de dañar la salud y al ecosistema, a fin de acondicionarle una posterior valorización o disposición final (Moharir & Kumar, 2021).

En la línea de valorización a los RS, nace el concepto de bioenergéticos, que son los combustibles obtenidos de la biomasa procedentes de material orgánico de las actividades, agrícola, silvícola, pecuaria, algacultura, acuacultura, residuos de la pesca, domésticas, industriales, comerciales, de microorganismos, y de enzimas, así también sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables (Diario Oficial de la Federación, 2008).

A continuación, se describen las tecnologías de tratamiento de los RS, las cuales se dividen en dos grupos, en tratamientos biológicos mecánicos y tratamientos térmicos.

2.1. Tratamientos biológicos mecánicos

Son tecnologías de pretratamiento para cualquier tratamiento de residuos. Básicamente, estas tecnologías proporcionan una desviación de residuos sólidos de la exposición directa a los desechos (Banerjee et al., 2019).

2.1.1. Rellenos sanitarios

El relleno sanitario es el procedimiento de eliminación organizada de residuos biodegradables y no biodegradables en un lugar de enterramiento terrestre designado o vertedero, que está situado fuera de las zonas suburbanas de un municipio. El relleno sanitario ha sido una de las vías de eliminación de residuos más convencionales y lucrativas que se han seguido en varios países. Los rellenos sanitarios actúan como reactores ecológicos donde los residuos sufren transformaciones físicas, químicas y biológicas. Por lo tanto, los factores críticos para un vertido sostenible son los revestimientos de los vertederos, el grosor de la cubierta del suelo, la recolección de los lixiviados, la recuperación de los gases del vertedero y las instalaciones de almacenamiento (Nanda & Berruti, 2021).

Un relleno sanitario funcional siempre se debe construir con una instalación de tratamiento de lixiviados para eliminar los contaminantes peligrosos en el lixiviado. Por lo tanto, encontrar un método sostenible para el tratamiento de los lixiviados siempre ha sido una prioridad para los gestores de los vertederos, con el fin de descargar de forma segura los lixiviados tratados en las cuencas hidrográficas sin poner en peligro el medio ambiente (Kamaruddin et al., 2017).

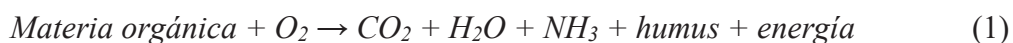
Además, la selección de un sitio apropiado para un relleno sanitario municipal de desechos sólidos es un medio eficaz para frenar la contaminación desde su origen porque un sitio inadecuado puede tener impactos ambientales, económicos y ecológicos negativos, que en última instancia afectarán la salud humana (Wang et al., 2018). Además, un relleno sanitario incluye el esparcimiento de los residuos y su posterior compactación en capas para obtener la uniformidad en todo el sitio. Luego, la basura se cubre con un suelo de casi 12-15 cm de espesor. La cobertura final del suelo es de 0,5 a 1 m para evitar molestias causadas por el vertido de residuos al aire libre, como el aumento de temperatura debido a la actividad

microbiana que tiene lugar durante el período de tiempo dado, y el gas emitido, que principalmente es metano en pequeñas cantidades (Moharir & Kumar, 2021).

2.1.2. Compostaje

El compostaje es un proceso aeróbico, durante el cual los desechos orgánicos son degradados biológicamente por microorganismos a un material similar al humus. El producto final no debe contener patógenos ni semillas viables, y debe ser estable y adecuado para su uso como mejorador del suelo. Muchos factores, como el contenido de oxígeno, la humedad, la composición del alimento, el pH y la temperatura, atañen el proceso de compostaje y, finalmente, al producto final. Asimismo, estos parámetros están estrechamente conectados (Partanen, Hultman, Paulin, Auvinen, & Romantschuk, 2010).

Los residuos sólidos orgánicos son aptos para el compostaje, ya que consisten de materia orgánica heterogénea, que incluye azúcares, grasas, proteínas, hemicelulosas, celulosas y lignina, que son importantes fuentes de energía para los microorganismos involucrados. Durante el proceso de compostaje, los microorganismos descomponen los residuos sólidos orgánicos en CO_2 , H_2O , NH_3 y liberan cantidades considerables de energía térmica (Fan, Li, ter Heijne, Buisman, & Chen, 2021). Este proceso se muestra en:



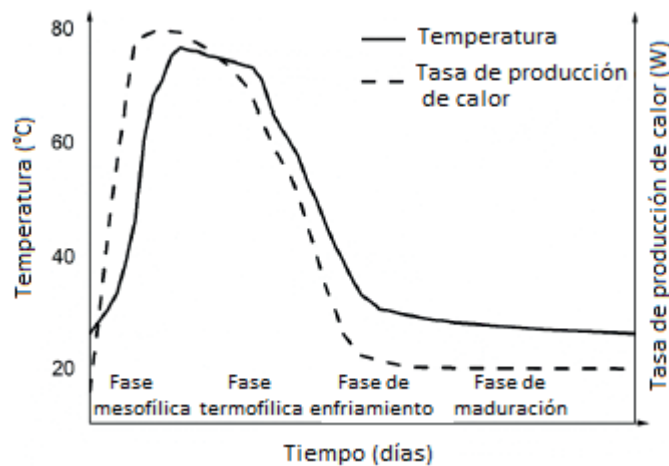
Parte de la energía generada se utiliza para mantener el metabolismo microbiano y el resto normalmente se pierde en el entorno circundante en forma de calor (Zhao, Gao, & Guo, 2017). Sin embargo, el calor generado generalmente se ignora, ya que el objetivo principal del compostaje es la eliminación segura de los residuos sólidos orgánicos y la producción de compost para el suelo.

Generalmente, el compostaje consta de cuatro etapas según sus regímenes de temperatura: etapa mesofílica, etapa termofílica, etapa de enfriamiento y etapa de maduración (Partanen et al., 2010). La figura 2 muestra los cambios en la temperatura y la tasa de producción de calor durante estas cuatro etapas. En la etapa mesofílica y la etapa termofílica, la tasa de producción de calor es alto y se mantiene alto durante un largo período, porque los microbios involucrados degradan rápidamente los compuestos ricos en energía y fácilmente degradables (almidones, azúcares y grasas) y algunas sustancias más resistentes (proteínas, hemicelulosa y celulosa). Además, las altas temperaturas pueden acelerar la descomposición

de proteínas, grasas y carbohidratos complejos como la celulosa. Estas dos fases pueden durar desde varias semanas (residuos de alimentos) hasta varios meses (residuos lignocelulósicos) con un aislamiento adecuado (Tuomela, Vikman, Hatakka, & Itävaara, 2000).

En la etapa de enfriamiento y la etapa de maduración, la actividad microbiana disminuye debido al agotamiento de materiales fácilmente degradables. Como resultado, la tasa de producción de calor disminuye, y la temperatura de la pila del compost declina. La etapa de enfriamiento y la etapa de maduración pueden durar de varias semanas a varios meses (Fan et al., 2021).

Figura 1. Esquema del proceso de compostaje. Tomado de Fan et al. (2021)



El proceso de compostaje puede liberar una gran cantidad de calor, especialmente en las dos primeras etapas. La producción de calor se origina a partir de la energía química almacenada en la materia orgánica. La energía final del compostaje es la misma que la de la combustión de los sustratos, ya que ambos son procesos aeróbicos si todos los sustratos están completamente oxidados (Smith, Aber, & Rynk, 2017). Con el rápido aumento de la demanda energética mundial, el calor generado gana cada vez más interés, ya que puede verse como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles y una de las principales posibilidades para prevenir el calentamiento global (Benjamin, Andiappan, Lee, & Tan, 2020).

2.1.3. *Vermi-compostaje*

En los últimos años, diversos estudios e informes han demostrado que el vermi-compostaje de residuos orgánicos por parte de las lombrices de tierra es el reciclaje de residuos preferido a partir de un punto de vista ecológico y económico (Kiyasudeen, Ibrahim, Quaik, & Ismail, 2016). Además, es un proceso que se puede utilizar a escalas pequeñas (a nivel del hogar) y a muy grandes escalas (varios hogares, aldeas o una ciudad entera) (J. W. C. Wong, Tyagi, & Pandey, 2017).

El proceso de vermi-compostaje se realiza en un rango de temperatura de 25-40 °C, pH casi neutro (6,5-8,5) y alta humedad (60-70%) para sostener una gran población de lombrices de tierra. Degrada los desechos orgánicos en aproximadamente 2-4 meses y el producto final es inodoro, desinfectado y vermicompost altamente nutritivo, adecuado para abono orgánico de suelos agrícolas con reducida fitotoxicidad (Kaur, 2020). Además, las lombrices de tierra liberan fluidos celómicos en los que hay mucocitos, vacuolocitos, granulocitos y linfocitos, que matan bacterias y parásitos presentes en los desechos, como resultado el vermicompost no tiene olor ni patógenos. El vermicompost se considera un producto excelente de naturaleza homogénea e inodoro, rico en microflora y tiende a retener más nutrientes de las plantas durante un período más largo (Garg & Gupta, 2009).

Vermi-tecnología es una combinación de varios procesos para descomponer y estabilizar materiales de desechos orgánicos a través de la acción en conjunto de lombrices de tierra y microorganismos en un ambiente aeróbico. Por lo general, implica la ingestión, digestión y absorción de desechos orgánicos que realizan las lombrices de tierra en un rango de temperatura mesófila seguida de la excreción de los desechos a través del sistema metabólico de las lombrices. Al final, se produce un producto de color oscuro, homogéneo y estable conocido como vermicompost, con altos niveles de nutrientes vegetales en comparación con el material parental (Gupta & Garg, 2017).

Las lombrices de tierra tienen una doble acción en el proceso: segregan enzimas para degradar el material de desecho orgánico y proliferan el crecimiento de microorganismos en el material de desecho. Se estima que alrededor de 5 kg de lombrices de tierra pueden convertir 1 tonelada de desechos orgánicos en alrededor de 0,5 toneladas de vermicompost en solo 30 días si se les proporciona temperatura (25-40 °C) y humedad (60-70%) óptimas.

Y la cantidad inicial de residuos orgánicos se reduce entre un 30 y un 40% en forma de vermicompost al final del proceso (Garg & Gupta, 2009).

Casi todos los desechos sólidos orgánicos no tóxicos, como el estiércol de animales, los residuos agrícolas, los residuos de la industria de caña de azúcar, los desechos de la industria de procesamiento de alimentos, los desechos de la industria de la pulpa de papel y los lodos de alcantarillado, constituyen una buena materia prima para el vermicompostaje. De esta manera, el uso de vermi-compostaje tiene dos ventajas: por un lado, se reduce la contaminación por residuos sólidos; por el otro, los desechos se convierten en compost (Gupta & Garg, 2017).

2.1.4. Digestión anaeróbica o biometanización

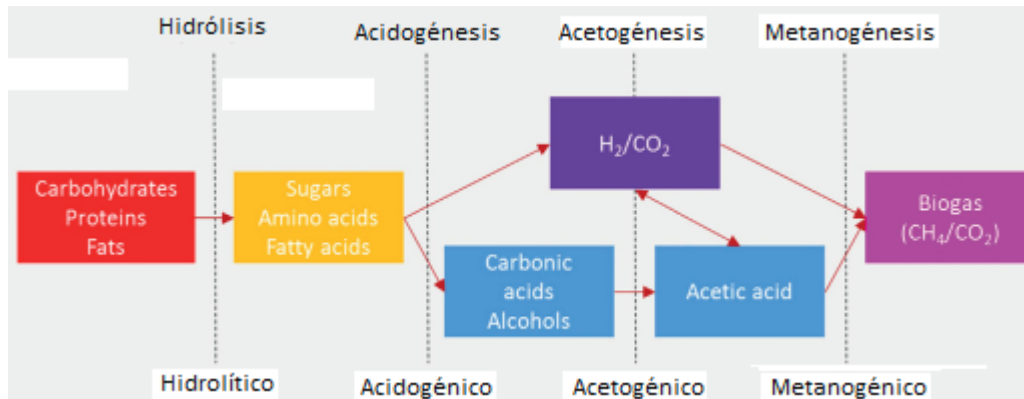
La digestión anaeróbica (DA) o biometanización es un proceso microbiano en el que los materiales orgánicos complejos se descomponen en sus componentes químicos más simples mediante varias enzimas. Esto ocurre en ausencia de oxígeno y da como resultado la producción de biogás y un digestato. La composición del biogás es aproximadamente 60% de metano y 40% de dióxido de carbono (CO₂). Las materias primas típicas para los reactores de DA a menudo consisten de orines de animales, cultivos energéticos y otros desechos agrícolas, minoristas e industriales (Roddy, 2012).

El proceso de DA se divide conceptualmente en cuatro etapas, que ilustran la secuencia de actividades microbianas que ocurren en el procedimiento de producción de biogás como se observa en la figura 2.

1. Hidrólisis. Los materiales orgánicos complejos (proteínas, lípidos y carbohidratos) se descomponen en composiciones de bajo peso molecular, como aminoácidos, ácidos grasos, glicerol y azúcares simples (Achinas, Achinas, & Euverink, 2020).
2. Acidogénesis. Las bacterias ácidas promueven un proceso de fermentación, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV), hidrógeno, alcoholes y dióxido de carbono.
3. Acetogénesis. El ácido acético, el CO₂ y el hidrógeno se forman a partir de los AGV por bacterias o acetógenos formadores de ácido.
4. Metanogénesis. Las bacterias metanogénicas continúan consumiendo AGV y producen gas metano reduciendo el CO₂ con H₂ en metano (Roddy, 2012).

Figura 2. Redes de digestión anaeróbica para producir biogás a partir de biomasa.

Tomado de Roddy (2012)



El biogás producido puede servir como combustible renovable para diversos fines, por ejemplo, en la producción de calor y/o energía por combustión directa. El digestato producido se puede utilizar como fertilizante, sujeto a métodos adecuados de almacenamiento y aplicación para evitar la lixiviación de nitratos (Holm-Nielsen, Al Seadi, & Oleskowicz-Popiel, 2009). Las materias primas con un alto contenido de lípidos tienden a producir mayores rendimientos de metano, mientras que las materias primas con un alto contenido de carbohidratos tienden a producir más CO₂ (Roddy, 2012).

2.2. Tratamientos térmicos

El objetivo principal de estas tecnologías son minimizar la liberación de desechos tóxicos y la parte residual del tratamiento, y las tecnologías principales son la incineración, pirólisis y gasificación (Banerjee et al., 2019).

2.2.1. Incineración

La incineración de residuos es una tecnología de gestión de residuos muy sólida y puede gestionar una amplia gama de tipos de residuos y fracciones de material en residuos sólidos mezclados. Uno de los principales impulsores con respecto a la implementación de la incineración de desechos a nivel internacional es la minimización de los desechos combustibles (y biológicamente degradables) que actualmente se envían a los rellenos sanitarios, pero también el beneficio adicional de recuperar la energía contenida en los desechos es cada vez más importante (Astrup, Møller, & Fruergaard, 2009).

El proceso de incineración genera calor, que se recupera y utiliza como tal o se convierte en energía eléctrica, por ejemplo, se puede utilizar en la operación de turbinas a base de vapor para generación de energía, así como en la operación de intercambiadores de calor (Hameed et al., 2021). Sin embargo, en algunos casos, la incineración se utiliza únicamente para desinfectar y reducir el volumen. Los desechos se reducen al 10-15 % de su peso y hasta el 30 % de su volumen después de la incineración (Jaunich et al., 2016).

El destino de los residuos depende principalmente de su calidad ambiental. Las cenizas de fondo generalmente se clasifican como no peligrosas y, por lo tanto, se pueden considerar para diversas aplicaciones, como en la construcción de carreteras, como material de subbase. Las fracciones más finas (principalmente cenizas de calderas y volantes) pueden ser peligrosas debido a las sales, metales pesados, biocidas y sustancias orgánicas. Las cenizas volantes representan alrededor del 1-3 % del total de residuos. Hasta la década de los ochenta, la principal preocupación eran las emisiones gaseosas de los incineradores, entonces se monitorearon las emisiones de material particulado y se implementaron sistemas mejorados de tratamiento de gases de combustión, y la atención se centró en la gestión de los RS de incineración (Joseph, Snellings, Van den Heede, Matthys, & De Belie, 2018).

Por otro lado, la energía recuperada de los residuos puede sustituir a otros combustibles con el consiguiente ahorro de emisiones, por ejemplo, de las centrales eléctricas de carbón. Los residuos sólidos del incinerador también pueden sustituir a los materiales de construcción naturales, con lo que también se ahorra el consumo de combustible (Astrup et al., 2009).

Los principales tipos de desechos sujetos a incineración son los desechos municipales, los desechos industriales no peligrosos, los desechos peligrosos, los lodos de depuradora y los desechos clínicos. En su mayoría, todos los residuos no peligrosos no reciclables (residuos de la industria del papel y la madera, etc.) se incineran y constituyen la mayor parte del volumen (Joseph et al., 2018).

2.2.2. Pirólisis

Pirólisis es la degradación térmica de residuos sólidos en una atmósfera inerte al romper los enlaces químicos a alta temperatura, lo que requiere un aporte de energía externa (Y. Zhang et al., 2020). Durante el proceso de pirólisis, la entrada de energía externa

proporciona el calor necesario para la descomposición térmica de los RS. En comparación con la incineración, el proceso de pirólisis de RS hace que sea mucho más fácil prevenir la formación de grandes dioxinas y reducir la formación de NO_x debido a las temperaturas más bajas y las condiciones inertes. Debido a la inestabilidad térmica de la materia orgánica, los residuos sólidos se someten a una serie de reacciones químicas durante el proceso de pirólisis, y los productos finales de pirólisis incluyen gas de síntesis, aceite de pirólisis y carbón (Du *et al.*, 2021).

El aceite pirolítico, también conocido como alquitrán, es un producto pirolítico típico e importante. El alquitrán es rico en hidrocarburos, hidrocarburos aromáticos, derivados del benceno y compuestos oxigenados (Quesada, Calero, Martín-Lara, Pérez, & Blázquez, 2019). El alquitrán normalmente tiene un alto poder calorífico y tiene aplicaciones potenciales como combustible alternativo. Las propiedades del carbón vegetal dependen de la composición de los residuos sólidos, que pueden utilizarse potencialmente como materia prima para enmiendas del suelo, fertilizantes y adsorbentes (Du *et al.*, 2021).

Principalmente, el carbón, los residuos sólidos y el gas de síntesis se producen a partir de este proceso, generalmente una mezcla de carbono y ceniza sin quemar. El producto se puede condensar para producir además de alquitrán y aceite, también cera y lubricantes. El gas de síntesis generado por pirólisis normalmente contiene un valor calorífico neto de 10-20 MJ/Nm³ (Hameed *et al.*, 2021).

2.2.3. Gasificación

La gasificación se encuentra en algún lugar en medio del pirólisis y la combustión en lo que respecta a la temperatura de los procesos. Ocurre en presencia de oxígeno, aire, vapor o en combinación a una temperatura superior a 650 °C. El poder calorífico neto es menor que el del combustible obtenido por combustión e incineración, generalmente en el rango de 4–14 MJ/Nm³. El proceso es exotérmico, por lo que la fuente externa es necesaria para satisfacer las necesidades energéticas (Hameed *et al.*, 2021).

En el proceso de gasificación ocurren múltiples reacciones en condiciones aleatorias. Las fases críticas de este procedimiento son el secado, pirólisis, reducción y oxidación. Una nueva fase, que implica la desintegración del alquitrán, que también implica la comprensión para el desarrollo de C_xH_y más ligero debido a la descomposición de vastos contenidos de

alquitrán. Se utilizan muchos tipos de reactores para procesar todas estas reacciones con características distintivas de alimentación y condiciones operativas. Estos reactores se denominan gasificadores (J. Zhang et al., 2013).

Los gasificadores son reactores que se utilizan para procesar biomasa y desechos pretratados a escala piloto, de laboratorio y comercial. Los gasificadores son de varios tipos basados en el enfoque de interacción entre la materia prima y el agente que puede ser corriente, contracorriente o flujo cruzado. La velocidad de transferencia de calor, que podría proporcionarse a través de la fuente externa o interna y el tiempo de residencia en la zona de reacción, podría variar de muchas horas a algunos minutos. Los principales reactores que se emplean en la gasificación de biomasa son el reactor de flujo arrastrado, de lecho fijo, de lecho fluidizado, de horno rotatorio y de plasma (Molino, Chianese, & Musmarra, 2016).

3. Gestión de tratamiento de residuos sólidos en Perú

En el país existen diversos problemas en cuanto a la gestión de RS, a pesar de que se contaba con una ley general de residuos sólidos promulgada desde el 2004. Y es que cada día aumentan los habitantes urbanos, un aproximado de 75% de habitantes viven en las zonas urbanas actualmente y producen más basura diariamente, a comparación de hace 10 años cuando la basura producida alcanzaba las 13 mil T/día, y hoy en día se obtiene 18 mil T/día. Además, el 50 % de estos desechos no tienen una disposición adecuada, lo que se refleja en calles sucias, ciudades, playas y ríos contaminados (Ministerio del Ambiente, 2020).

Por todo ello, se volvió necesario implementar una mejor política y gestión pública de largo plazo, que cuente con normas, proyectos emblemáticos, incentivos, nuevas propuestas tecnológicas, asesoramiento técnico y capacitación descentralizados, además de llevar a cabo abundantes programas de educación y ciudadanía.

En ese sentido, el 2017 se promulgó la ley sobre la Gestión integral de residuos sólidos que enfatiza lo siguiente:

- (i) promoción de la economía circular,
- (ii) recuperación y reciclaje de residuos,
- (iii) responsabilidad extendida al productor,
- (iv) responsabilidad compartida, y
- (v) protección del medio ambiente y la salud humana.

Estas leyes y reglamentos/directrices estipulan que los gobiernos locales son responsables del manejo integral de los RS como parte del plan ambiental nacional del gobierno (El Peruano, 2017).

Asimismo, el Ministerio del Ambiente (Minam) como parte de esta nueva ley estableció el programa de incentivos a la mejora de la gestión municipal, con el objetivo de promover que las municipalidades pongan en marcha un sistema de administración integral de residuos, primando la valorización de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos municipales, con el objetivo de garantizar la protección de la salud de las personas y del ecosistema, logrando valorizar cerca de 93 mil toneladas de RS durante el 2020 a lo largo de todo el territorio nacional (Minam, 2021).

Cabe resaltar lo innovadora que resulta esta nueva ley en América Latina y el mundo, ya que promueve la acción de minimizar la producción de RS y los que produzcamos sean insumos de otros procesos productivos a través del reciclaje, promoviendo así la economía circular, es decir, reingresando residuos como insumos de otros productos (Minam, 2020).

Respecto a las tecnologías de tratamiento de RS que se vienen aplicando en el país, a continuación, se mencionan algunos casos. En cuanto a rellenos sanitarios, actualmente existen 63, distribuidos en diferentes departamentos, sin embargo, al oeste se encuentra la mayoría de estos rellenos; en Lima se ubican 4: Modelo del Callao, Zapallal, Huaycoloro, y Portillo Grande (Minam, 2021).

El relleno sanitario de Zapallal recubre el 37,5 % de los residuos de Lima norte y el 6,7 % de Lima centro; el Modelo del Callao recubre el 62,5 % de los desperdicios de Lima norte y 40 % de Lima centro; Huaycoloro recubre el 100 % de Lima este, 26,7 % de Lima centro y 9,1 % de Lima sur; finalmente, Portillo Grande recubre el 90,1 % de residuos de Lima sur y 26,7 % de Lima centro. En otros departamentos se ubican el relleno de seguridad de Chíncha y los rellenos sanitarios de Tarma, Santa Cruz y Cajamarca. Al noreste, en la Amazonía, se ubica el de Maynas (Innova Ambiental, s/f).

Respecto al proceso de compostaje, en el país la mayoría de los municipios han diseñado un plan para ejecutar la medida, si bien algunos de ellos aún se encuentran en su etapa de implementación, algunos municipios han mostrado resultados prometedores, por ejemplo, el Municipio de Huánuco. Este municipio trabaja sobre la base de la recogida

selectiva solamente de los residuos sólidos orgánicos de zonas residenciales y generadores no domésticos como establecimientos comerciales, mercados de alimentos, instituciones educativas e instituciones públicas (Municipalidad de Huánuco, 2019). En 2018, el municipio recolectó y procesó aproximadamente 900 toneladas de residuos sólidos orgánicos y produjo 448 toneladas de compost. Posteriormente, el compost se utilizó para la reforestación, fertilización de parques y en vertederos agrícolas.

Por otro lado, hay algunos estudios que utilizan las propiedades del vermi-compostaje para la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados debido a pasivos ambientales mineros, como es el caso de Huamantanga-Canta (Contreras, Cuba, & Rojas, 2021). Así también hay casos que ayudan en la gestión de los residuos orgánicos mediante esta tecnología, por su capacidad de digerir restos de frutas, verduras, y estiércol, como es el caso registrado en Jaén-Cajamarca (Huaccha, Fernández, Quiroga, & Álvarez, 2019).

Por último, en la tecnología de digestión anaerobia, se encuentran varios casos, generalmente en criaderos y granjas que utilizan los excrementos de animales de crianza, entre ellos cuy, bovinos, cerdos, gallinas, etc., para producir bioenergéticos como biogás, biol y bioabonos principalmente. Por mencionar algunos ejemplos, se tiene en Amazonas, un sistema instalado de producción de biogás y bioabonos alimentado con estiércol de ganado bovino (Barrena Gurbillón et al., 2019). En Lima, en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina se aprovecha el estiércol de gallina para la elaboración de biol (León, 2012). Y en Arequipa utilizan estiércol de ganado y desechos de matadero para producción de biogás (Reátegui et al., 2017). Asimismo, se utiliza esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas y mejorar los servicios básicos de saneamiento, como se realizó en el poblado de Antilla - provincia de Abancay (Morán & Chávez, 2020).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La gestión de RS no solo se debe ocupar de su tratamiento y eliminación, sino que es un sistema integral que incorpora reducción de generación de residuos, recolección, segregación y transporte adecuado a su correspondiente centro de reciclaje. La eliminación de los RS de forma convencional no es tan eficaz para reducir su efecto nocivo; como ejemplo, para los residuos biodegradables, el compostaje, el vermi-compostaje y la digestión anaerobia son métodos muy útiles, ya que la parte residual se puede utilizar como fertilizante, mejorador de suelos o bioenergéticos (Partanen et al., 2010).

Algunos métodos de eliminación como incineración, gasificación y pirólisis, pueden minimizar el volumen de desechos sólidos y su efecto letal; además estos métodos son eficientes para generar bioenergéticos, por ejemplo, gas de síntesis, que puede ser una fuente importante de energía en un futuro reciente. Asimismo, investigaciones sobre diferentes tecnologías, como pirólisis por arco de plasma o esterilización en autoclave para eliminación segura de residuos sólidos, se encuentran en progreso activo (Banerjee et al., 2019).

Investigaciones recomiendan invertir en la administración sostenible de los RS, debido a las mejoras en salud que generarían y también por un aspecto económico. Los residuos no recogidos y mal eliminados impactan considerablemente en la salud y el ecosistema, los costos de abordar este impacto son bastante superiores al de desarrollar y poner en marcha sistemas simples y adecuados de gestión de los residuos (Banerjee et al., 2019; The World Bank, 2021).

El ser humano, consciente o inconscientemente, está generando una enorme cantidad de desechos sólidos que tiene como consecuencia graves problemas relacionados con la salud; ante ello, se recomienda la prevención de estas prácticas para evitar un efecto perjudicial no reversible al sistema y el medio ambiente que habitamos. Esta propuesta es factible mediante un sistema adecuado de gestión de residuos y, lo que es más importante, la conciencia pública (Banerjee et al., 2019).

Ciertamente, en el Perú existe un amplio campo que urge de una idónea planificación de disposición final de RS, sin embargo, el vertido de los desechos en sitios que carecen de cualquier tipo de protección ambiental todavía se practica comúnmente en muchas ciudades

peruanas, por lo que investigaciones y trabajos futuros deben estar dirigidos a solucionar los problemas en estos campos (Babu, Prieto Veramendi, & Rene, 2021).

Con la nueva ley integral de RS se espera mejorar la situación actual del país en cuanto a la gestión de RS; y que las municipalidades promuevan y mantengan un desarrollo sostenible, desarrollando una serie de acciones que trasciendan en lo económico, social y político, mejorando la administración de los recursos y dando un mejor y oportuno servicio al ciudadano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achinas, S., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2020). Microbiology and biochemistry of anaerobic digesters: An overview. En L. Singh, A. Yousuf, & D. M. Mahapatra (Eds.), *Bioreactors* (pp. 17–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00002-4>

Astrup, T., Møller, J., & Fruergaard, T. (2009). Incineration and co-combustion of waste: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(8), 789–799. <https://doi.org/10.1177/0734242X09343774>

Babu, R., Prieto Veramendi, P. M., & Rene, E. R. (2021). Strategies for resource recovery from the organic fraction of municipal solid waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 3, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100098>

Banerjee, P., Hazra, A., Ghosh, P., Ganguly, A., Murmu, N. C., & Chatterjee, P. K. (2019). Solid waste management in India: A brief review. En S. K. Ghosh (Ed.), *Waste management and resource efficiency* (pp. 1027–1049). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7290-1_86

Barrena Gurbillón, M. A., Cubas Alarcón, F., Gosgot Angeles, W., Ordinola Ramírez, C. M., Rascón Barrios, J., & Huanes Mariños, M. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725–734. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>

Benjamin, M. F. D., Andiappan, V., Lee, J.-Y., & Tan, R. R. (2020). Increasing the reliability of bioenergy parks utilizing agricultural waste feedstock under demand uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122385>

Carpio, J., Fuentes, C., Prado, J., & Sánchez, P. (2008). *Gestión de residuos sólidos municipales*. Lima (Perú): ESAN Ediciones.

Contreras, M. K., Cuba, S. S., & Rojas, A. E. (2021). *Eficiencia del compostaje y vermicompostaje en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo por*

pasivos ambientales mineros de Huamantanga—Canta (Universidad Nacional del Callao). Universidad Nacional del Callao. Recuperado de <https://bit.ly/3c3F1b8>

Diario Oficial de la Federación. *Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos*. , Art. 1 § (2008).

Du, Y., Ju, T., Meng, Y., Lan, T., Han, S., & Jiang, J. (2021). A review on municipal solid waste pyrolysis of different composition for gas production. *Fuel Processing Technology*, 224, 107026. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107026>

El Peruano. (2017). *Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Recuperado de <https://bit.ly/3AJpgRd>

Fan, S., Li, A., ter Heijne, A., Buisman, C. J. N., & Chen, W.-S. (2021). Heat potential, generation, recovery and utilization from composting: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105850>

Garg, V. K., & Gupta, R. (2009). Vermicomposting of agro-industrial processing waste. En P. Singh nee' Nigam & A. Pandey (Eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation: Utilisation of Agro-Residues* (pp. 431–456). Dordrecht: Springer Netherlands.

Gupta, R., & Garg, V. K. (2017). Vermitechnology for organic waste recycling. En J. W.-C. Wong, R. D. Tyagi, & A. Pandey (Eds.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 83–112). Elsevier.

Hameed, Z., Aslam, M., Khan, Z., Maqsood, K., Atabani, A., Ghauri, M., ... Nizami, A.-S. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136(110375). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110377>

Hamer, G. (2003). Solid waste treatment and disposal: Effects on public health and environmental safety. *Biotechnology Advances*, 22, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.007>

Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5478–5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>

Huaccha, A., Fernández, F., Quiroga, S., & Álvarez, B. (2019). Uso de la *Eisenia hortensis* (lombriz de tierra) en el vermicompostaje de residuos orgánicos. *Revista Científica Pakamuros*, *7*(2), 32–40. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v7i2.91>

Innova Ambiental. (s/f). Importancia de los rellenos sanitarios: El peligro de los botaderos en el Perú. Recuperado el 27 de septiembre de 2021, de Innova Ambiental website: <https://bit.ly/2XUjEFq>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). INEI - Estadísticas—Índice temático—Residuos. Recuperado el 17 de septiembre de 2021, de Residuos website: <https://bit.ly/3HhAdNF>

Jaunich, M. K., Levis, J. W., DeCarolis, J. F., Gaston, E. V., Barlaz, M. A., Bartelt-Hunt, S. L., ... Jaikumar, R. (2016). Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resources, Conservation and Recycling*, *114*, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.012>

Joseph, A. M., Snellings, R., Van den Heede, P., Matthys, S., & De Belie, N. (2018). The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials: A belgian point of view. *Materials*, *11*(1), 141. <https://doi.org/10.3390/ma11010141>

Kamaruddin, M. A., Yusoff, M. S., Rui, L. M., Isa, A. M., Zawawi, M. H., & Alrozi, R. (2017). An overview of municipal solid waste management and landfill leachate treatment: Malaysia and Asian perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(35), 26988–27020. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0303-9>

Kaur, T. (2020). Vermicomposting: An effective option for recycling organic wastes. En S. K. Das (Ed.), *Organic agriculture* (pp. 45–61). London: IntechOpen.

Kiyasudeen, K., Ibrahim, M. H., Quaik, S., & Ismail, S. A. (2016). Vermicomposting: An earthworm mediated waste treatment technique. En K. Kiyasudeen S, M. H. Ibrahim, S. Quaik, & S. Ahmed Ismail (Eds.), *Prospects of Organic Waste Management and the*

Significance of Earthworms (pp. 167–199). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24708-3_8

León, F. M. C. (2012). *Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avícola* (Universidad Nacional Agraria La Molina). Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de <https://bit.ly/3zMdHHC>

Ministerio del Ambiente. (2020). Nueva ley y reglamento de residuos sólidos. Recuperado el 11 de octubre de 2021, de Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos website: <https://bit.ly/3nbso45>

Ministerio del Ambiente. (2021a). Alrededor de 93 mil toneladas de residuos sólidos fueron valorizados en el 2020 a nivel nacional. Recuperado el 11 de noviembre de 2021, de <https://bit.ly/3qvnEIV>

Ministerio del Ambiente. (2021b). *Listado de rellenos sanitarios*. Recuperado de <https://bit.ly/3unvNyH>

Moharir, R. V., & Kumar, S. (2021b). Traditional solid waste treatment technologies. En S. Kumar, R. Kumar, & A. Pandey (Eds.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 23–45). Elsevier.

Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10–25.

Morán, R., & Chávez, E. (2020). *Implementación de biodigestores para mejorar el sistema de saneamiento ambiental en el poblado de Antilla—Provincia de Abancay* (Ingeniería, Universidad Ricardo Palma). Universidad Ricardo Palma. Recuperado de <https://bit.ly/3ifAgi3>

Municipalidad de Huánuco. (2019). *Resolución de alcaldía N 389-2019-MPHCO*. Recuperado de <https://bit.ly/3CQTmmI>

Nanda, S., & Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 1433–1456. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>

Partanen, P., Hultman, J., Paulin, L., Auvinen, P., & Romantschuk, M. (2010). Bacterial diversity at different stages of the composting process. *BMC Microbiology*, *10*(1), 94. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-10-94>

Quesada, L., Calero, M., Martín-Lara, M., Pérez, A., & Blázquez, G. (2019). Characterization of fuel produced by pyrolysis of plastic film obtained of municipal solid waste. *Energy*, *186*, 115874.

Reátegui, O. J., Cárdenas, H. L., Peña, D. G., Castro, V. J., Roque, R. F., Mejía, N. F., ... Mestas, R. S. (2017). Biogas production in batch in anaerobic conditions using cattle manure enriched with waste from slaughterhouse. *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 819–822. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191173>

Roddy, D. J. (2012). Biomass and biofuels – Introduction. En A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 1–9). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00501-1>

Smith, M. M., Aber, J. D., & Rynk, R. (2017). Heat recovery from composting: A comprehensive review of system design, recovery rate, and utilization. *Compost Science & Utilization*, *25*, S11–S22. Beijing: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1233082>

The World Bank. (2021). What a Waste 2.0—A global snapshot of solid waste management to 2050. Recuperado el 22 de septiembre de 2021, de What a Waste 2.0 website: <https://bit.ly/3wF2Bo6>

Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itävaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology*, *72*(2), 169–183. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)

Venkata Mohan, S., Amulya, K., & Annie Modestra, J. (2020). Urban biocycles – Closing metabolic loops for resilient and regenerative ecosystem: A perspective. *Bioresource Technology*, *306*, 123098. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123098>

Wang, Y., Li, J., An, D., Xi, B., Tang, J., Wang, Y., & Yang, Y. (2018). Site selection for municipal solid waste landfill considering environmental health risks. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.008>

Wong, J. W. C., Tyagi, R., & Pandey, A. (Eds.). (2017). *Current developments in biotechnology and bioengineering: Solid waste management*. Amsterdam: Elsevier.

Zhang, J., Weng, X., Han, Y., Li, W., Gan, Z., & Gu, J. (2013). Effect of supercritical water on the stability and activity of alkaline carbonate catalysts in coal gasification. *Journal of Energy Chemistry*, 22(3), 459–467. [https://doi.org/10.1016/S2095-4956\(13\)60060-1](https://doi.org/10.1016/S2095-4956(13)60060-1)

Zhang, Y., Cui, Y., Liu, S., Fan, L., Zhou, N., Peng, P., ... Cheng, Y. (2020). Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production—A review. *Bioresourcetechnology*, 297, 122480. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122480>

Zhao, R., Gao, W., & Guo, H. (2017). Comprehensive review of models and methods used for heat recovery from composting process. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4), 1–12. (mechanization). <https://doi.org/10.25165/ijabe.v10i4.2292>