



25TH ANNIVERSARY
2000-2025



Serie de orientaciones técnicas de GAIA para responsables políticos
y financieros sobre medidas rápidas en materia de residuos y metano

Residuos orgánicos Municipales

Estrategias para reducir las emisiones de metano

Resumen ejecutivo

Esta es la primera de la serie de guías técnicas de GAIA para responsables políticos y financieros sobre acciones rápidas en materia de residuos y metano. Siguiendo los compromisos del Compromiso Global sobre Metano y la Declaración de la COP29 para Reducir el Metano de los Residuos Orgánicos ([Declaración ROW](#)), los países firmantes se han comprometido a reducir significativamente las emisiones de metano de los residuos para 2030. Si bien esto supondrá un aumento de los recursos políticos y financieros destinados al sector de los residuos, es necesario garantizar que la aplicación de medidas para reducir las emisiones de metano esté en consonancia con los Principios de Justicia Ambiental para la Acción Rápida sobre Residuos y Metano.

Los residuos orgánicos son un foco crítico para la reducción del metano. Los residuos sólidos urbanos son una fuente importante de emisiones de metano, pero también presentan una de las oportunidades más rentables para una rápida acción climática. Políticas de gestión de residuos como la separación de residuos en origen, el reciclado y el compostaje podrían reducir las emisiones totales del sector de los residuos en un 84%, es decir, más de 1.400 millones de toneladas, lo que equivaldría a retirar de la circulación todos los vehículos de motor de Estados Unidos durante un año. El compostaje, la bioestabilización y las cubiertas biológicamente activas de los rellenos sanitarios pueden reducir las emisiones de metano de los residuos hasta en un 95%. Incluso medidas sencillas como la segregación de residuos y el compostaje orgánico pueden lograr una reducción del 62% de las emisiones de metano de los rellenos sanitarios.

Este kit de herramientas presenta seis estrategias clave para ayudar a los municipios a reducir las emisiones de metano de los residuos orgánicos: alimentación animal, compostaje, vermicompostaje, digestión anaeróbica, tratamiento de la mosca soldado negra y biocubiertas para rellenos sanitarios. El objetivo principal es evitar que los residuos orgánicos lleguen a rellenos sanitarios dando prioridad a la desviación y la recuperación de recursos. Reconociendo que algunos residuos pueden acabar en los rellenos, el conjunto de estrategias también incluye las biocubiertas como una solución esencial para mitigar el metano de los residuos existentes. Cada solución se evalúa en función de las necesidades de infraestructura, requisitos normativos, competencias necesarias y repercusiones sociales, económicas y medioambientales. Este análisis proporciona a los responsables municipales información clara sobre las condiciones favorables y las vías prácticas para la aplicación en contextos específicos.

Como conclusiones clave, el kit destaca que los residuos orgánicos, cuando se gestionan como un recurso, ofrecen a los municipios una poderosa oportunidad para apoyar la agricultura local, generar energía, crear puestos de trabajo y lograr reducciones significativas de metano. El verdadero valor de las tecnologías de gestión de residuos orgánicos reside en sus beneficios a largo plazo -protección del medio ambiente, mejora de la salud pública, cierre de los ciclos de nutrientes y creación de resiliencia comunitaria- incluso cuando los beneficios inmediatos del mercado no cubren todos los costes del sistema. Los municipios deben dar prioridad a la prevención y la reducción, redirigir los productos orgánicos a mercados secundarios o a la alimentación animal cuando sea posible, y devolver los nutrientes a los suelos mediante el compostaje o la recuperación de energía, dejando el vertido como último recurso debido a sus elevadas emisiones de metano y la pérdida de nutrientes.

La gestión eficaz de los residuos orgánicos comienza con una separación en origen, sistemas de recogida regulares y un compromiso activo de la comunidad, incluida la participación de los recicladores y los grupos locales. Eligiendo estrategias descentralizadas adecuadas al contexto y optimizando la logística para tratar los residuos lo más cerca posible de su origen, los municipios pueden reducir costes, minimizar la contaminación y crear oportunidades de empleo integradoras. En última instancia, la integración de la participación pública con soluciones técnicas adaptadas transforma los residuos orgánicos de un reto en un activo valioso para unas comunidades más sanas, sostenibles y equitativas.

Índice

Resumen Ejecutivo	2
Introducción	4
Estrategias	5
Compostaje	6
Vermicompostaje	7
Uso Directo como Alimentación Animal	8
Mosca Soldado Negra (BSF)	9
Digestión Anaeróbica	10
BioCubierta	11
Tiempo de Tratamiento	12
Requisitos Técnicos	13
Normativa y Permisos	13
Infraestructura	16
Aspectos Medioambientales	19
Reducción del Metano	19
Aspectos Económicos	20
Razonamiento Financiero	20
Escalabilidad	23
Aspecto Sociales	24
Potencial de Creación de Empleo	24
Desafíos y Oportunidades	27
Casos de Éxito	30
Conclusiones y Recomendaciones	34
Bibliografía	36
Recursos Adicionales	39
Agradecimientos	41

Introducción

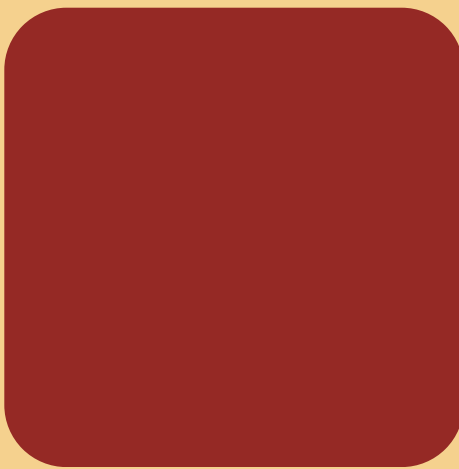
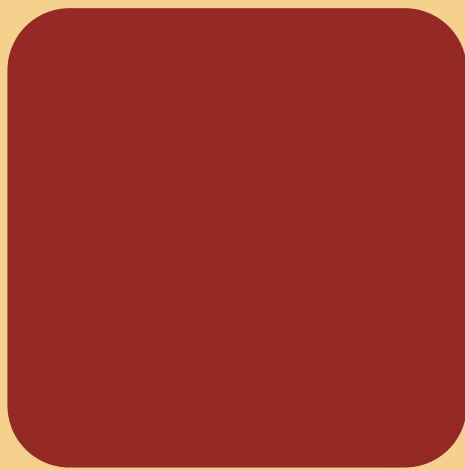
Reducir las emisiones de metano de los rellenos sanitarios es una de las estrategias de mayor impacto que pueden aplicar los municipios para hacer frente al cambio climático. El metano se genera cuando los residuos orgánicos, como los restos de comida y los recortes de jardín, se descomponen en rellenos sanitarios y vertederos en entornos con presencia restringida de oxígeno. La gestión de residuos orgánicos es, por tanto, una herramienta clave de mitigación climática para los gobiernos locales, con beneficios adicionales para la salud pública, la regeneración del suelo y la recuperación de recursos. La separación en origen de los residuos orgánicos, junto con el compostaje, la bioestabilización de los residuos y la cubierta biológicamente activa de los rellenos sanitarios pueden reducir las emisiones de metano de los residuos sólidos hasta en un 95%¹. Aunque este documento se centra en las opciones de tratamiento, es importante recordar que la prevención de residuos es la estrategia más preferible para reducir las emisiones de metano y debe tenerse en cuenta en cualquier política y programa de gestión de residuos.

Para ayudar a los responsables municipales a tomar decisiones, esta guía ofrece un marco comparativo y práctico para evaluar cinco estrategias viables y maduras: compostaje, vermicompostaje, digestión anaeróbica, mosca soldado negra (BSF) y biocubiertas de rellenos sanitarios. En lugar de ofrecer instrucciones técnicas paso a paso, el documento apoya la política y la planificación esbozando factores esenciales como las necesidades de infraestructura, las consideraciones sobre permisos y normativas, el rendimiento ambiental, la rentabilidad y la escalabilidad a pequeña, mediana y gran escala.

Entre los elementos esenciales para el éxito de la aplicación figuran la separación en origen y la integración del sector informal. Ambos se basan en los Principios de Justicia Medioambiental: respetar los límites planetarios para garantizar la equidad intergeneracional, valorar a todos los recicladores y trabajadores del sector, fomentar la inclusión y aprovechar los conocimientos locales, responder a la contaminación y a los daños medioambientales con responsabilidad y apoyar soluciones holísticas mediante el cambio de sistemas. Estos enfoques no sólo maximizan la eficiencia y la calidad del tratamiento, sino que también reducen la contaminación y los costes operativos. La integración de estos aspectos promueve además la educación pública, hace avanzar la equidad social y fomenta los sistemas de recogida apoyados por la comunidad.

Se exploran los retos comunes de la aplicación, las oportunidades emergentes y los estudios de casos reales, haciendo hincapié en la importancia de un diseño claro del sistema y un fuerte compromiso de la comunidad. Con las herramientas y los enfoques adecuados, los municipios pueden convertir los residuos alimentarios en un recurso valioso y, al mismo tiempo, promover los objetivos climáticos locales y mundiales.

¹ El metano importa: Un enfoque integral para la mitigación del metano. 2022. Fundación Changing Markets, Agencia de Investigación Ambiental, Alianza Global para Alternativas a la Incineración.



Estrategias



Compostaje

DEFINICIÓN

Descomposición biológica controlada de materiales orgánicos—como restos de comida, recortes de jardín y otros residuos biodegradables— en **un producto estable y rico en nutrientes conocido como compost.**

El proceso se produce principalmente en condiciones aeróbicas, en las que los microorganismos descomponen la materia orgánica en presencia de oxígeno, generando calor, reduciendo el volumen y estabilizando los nutrientes. Mientras que la descomposición natural puede producirse de forma lenta e irregular, el compostaje optimiza el entorno para la actividad microbiana mediante la gestión de factores como la humedad, el oxígeno, la temperatura y la relación carbono-nitrógeno. Fuentes: (21), (22), (23), (31)

RESULTADOS

El producto principal es un material orgánico estabilizado, el compost, que puede utilizarse como enmienda del suelo.

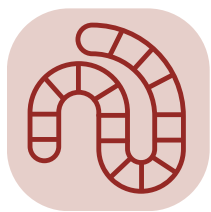
El compost maduro suele tener una textura desmenuzable, un color oscuro y un olor a tierra, con una relación carbono-nitrógeno inferior a 20, valores de pH entre 7 y 9 y mayores concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio en comparación con la materia prima. Los ácidos húmicos y fúlvicos del compost mejoran la retención de nutrientes y la estructura del suelo, mientras que el índice de germinación (IG) suele utilizarse para verificar la madurez, y los valores superiores al 80% se consideran estables y seguros para su aplicación. El compost puede utilizarse directamente en agricultura, jardinería o zonas verdes urbanas. Del compost maduro también se obtienen extractos líquidos, como el té de compost, para el tratamiento localizado del suelo y las plantas. Fuentes: (21), (23), (26), (31)

CONSIDERACIONES SOBRE LA ENTRADA DE RESIDUOS

Todos los materiales orgánicos para el compostaje deben estar limpios y adecuadamente separados en origen para minimizar la contaminación. A pequeña escala, los insumos suelen proceder de restos de cocina y recortes de jardín. A mediana escala, las fuentes incluyen mercados, oficinas, escuelas e instalaciones similares. Para el compostaje a gran escala o industrial, la materia orgánica se recoge de los flujos de residuos municipales, mercados e industrias alimentarias, donde mantener altos volúmenes de insumos limpios a menudo requiere una clasificación mecánica.

INVOLUCRAMIENTO COMUNITARIO

Puede implicar a las comunidades tanto a nivel doméstico como vecinal. El compostaje doméstico capacita a los individuos, mientras que el compostaje comunitario fomenta la acción colectiva. El éxito depende de un liderazgo local fuerte y de la cohesión social. La separación en origen es clave para un compostaje de alta calidad, por lo que la concienciación y la participación de la comunidad son fundamentales. Fuente: (31)



Vermi compostaje

DEFINICIÓN

Proceso biológico que utiliza lombrices de tierra - principalmente *Eisenia foetida* y *Eudrilus eugeniae*- para transformar los residuos orgánicos en dos productos de alto valor: una enmienda orgánica estable conocida como vermicompost y un subproducto líquido a menudo llamado lixiviado de vermicompostaje.

El proceso se basa en gusanos que viven en la superficie y se alimentan de residuos orgánicos en condiciones aeróbicas, húmedas y de temperatura controlada. Fuentes: (8), (12), (17)

PRODUCTOS

Tres productos principales: **vermicompost, lixiviado de vermicompostaje (humus líquido) y exceso de lombrices.** El vermicompost es una enmienda orgánica estabilizada, rica en humus, microbios beneficiosos y nutrientes como nitrógeno (1-2%), fósforo (0,6-1,5%) y potasio (0,4-0,6%). El lixiviado de vermicompostaje, un líquido rico en nutrientes, puede utilizarse como pulverización foliar o empapando el suelo. El exceso de lombrices -resultante de colonias sanas y en reproducción- puede cosecharse como fuente de proteínas para la avicultura o la acuicultura, o reutilizarse como semilla para nuevos sistemas de vermicompostaje. Todos los productos tienen valor en la agricultura regenerativa y los sistemas circulares de nutrientes. Fuentes: (8), (12), (13), (17)



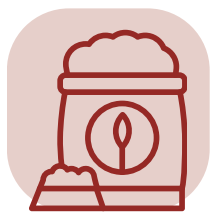
CONSIDERACIONES SOBRE LA ENTRADA DE RESIDUOS

Todos los materiales orgánicos deben estar limpios. Aunque normalmente se utilizan materiales de origen vegetal, a menudo se añaden estiércoles animales como iniciadores, por ejemplo, de vaca. Sin embargo, las lombrices son sensibles a las altas concentraciones de sal, aceite, alimentos ácidos (como los encurtidos) y productos químicos como el bicarbonato, el vinagre y las lociones. A pequeña escala, los insumos adecuados incluyen residuos vegetales como cáscaras de verduras y posos de café. A mediana escala, los residuos se recogen localmente en mercados, escuelas y pequeñas instituciones. A escala industrial, la materia prima procede principalmente de subproductos agroindustriales como residuos de frutas, cáscaras de café o estiércol, asegurados mediante contratos para garantizar la consistencia y la baja contaminación; deben evitarse los residuos municipales mezclados, aunque pueden añadirse residuos orgánicos cuidadosamente clasificados en cantidades limitadas.



INVOLUCRAMIENTO COMUNITARIO

Muy accesible y práctico, promueve la educación ambiental en escuelas y barrios. Fomenta el cambio de comportamiento y el éxito depende de un liderazgo local fuerte y de la cohesión social. La separación en origen es clave, por lo que la concienciación y la participación de la comunidad son fundamentales. Fuentes: (19), (12)



Uso directo como alimentación animal

DEFINICIÓN

Consiste en la utilización controlada de **residuos alimentarios** - comida en mal estado- como **alimento para el ganado**.

Esto incluye dos enfoques principales: la aplicación directa, donde los residuos de alimentos se envían de fuentes como hoteles a granjas para el enriquecimiento del suelo o la alimentación animal, y el procesamiento, donde los residuos de carne y aves de corral se recogen por separado y se tratan en plantas de transformación a alta temperatura y presión para producir alimento o componentes de alimentos para mascotas. Los rumiantes suelen quedar excluidos de los residuos cárnicos debido al riesgo de enfermedades, y su manipulación segura es esencial para garantizar la salud de los animales. Fuentes: (33), (34)

PRODUCTOS

A pequeña y mediana escala, los residuos alimentarios son consumidos directamente por los animales **sin que se produzca una producción física diferenciada: el beneficio se integra en el crecimiento o la productividad del animal. En sistemas más industrializados, los residuos alimentarios se convierten en ingredientes estandarizados para la alimentación animal.**

Éstos pueden secarse, triturarse o granularse para garantizar su seguridad y prolongar su vida útil. Los perfiles nutricionales varían: la harina de coco procesada contiene entre un 25 y un 30% de proteína bruta, y los residuos de manzana ofrecen un 12% de proteína y un 60% de nutrientes digestibles totales. Fuente: (33)

CONSIDERACIONES SOBRE LA ENTRADA DE RESIDUOS

A cualquier escala, la separación en origen es esencial para garantizar un flujo de residuos limpio y de alta calidad y evitar la contaminación. A pequeña escala, las materias primas aceptables incluyen restos de cocina limpios (por ejemplo, verduras, restos de panadería), que pueden requerir tratamiento si contienen productos animales. A mediana escala, la atención se centra en los residuos limpios y segregados procedentes de empresas alimentarias y establecimientos comerciales. A gran escala, los subproductos limpios y uniformes de las agroindustrias (como procesadores de alimentos y mataderos) se gestionan mediante contratos a largo plazo, mientras que los residuos municipales postconsumo se evitan debido a sus altos niveles de contaminación.

INVOLUCRAMIENTO COMUNITARIO

Implica a las comunidades a través de asociaciones entre agricultores locales, proveedores de alimentos, mercados de alimentos, generadores de residuos alimentarios (restaurantes, comedores escolares), huertos comunitarios, etc. Su escala permite fomentar la gestión in situ y actividades como visitas educativas. Refuerza la concienciación pública y crea hábitos duraderos de reducción de residuos. Fuentes: (4), (1)



Mosca soldado negra (BSF)

DEFINICIÓN

Utilización controlada del insecto *Hermetia illucens* para convertir los residuos orgánicos en dos valiosos subproductos: larvas ricas en proteínas y excrementos ricos en nutrientes.

Las larvas pueden reducir el peso de los residuos orgánicos hasta en un 80%, convirtiéndolos en biomasa larvaria (15-20% del peso de los residuos de entrada) y en frass (otro 30-40%), dependiendo del sustrato y del diseño del sistema. Fuentes: (4), (88).

PRODUCTOS

Proteínas derivadas de las larvas y frass, con extracción opcional de aceite y quitina. Las larvas secas contienen aproximadamente un 40-44% de **proteínas** y un 30-38% de grasas, lo que las convierte en un ingrediente valioso en las fórmulas de alimento para aves de corral, acuicultura y animales de compañía. **La fracción oleosa -rica** en ácidos láurico, palmítico, oleico y linoleico y otros ácidos grasos de cadena media- puede extraerse y utilizarse en fórmulas de alimento con efectos positivos para la salud animal (antimicrobianos y del sistema inmunitario). **El excremento (frass)**, un subproducto granulado del proceso de digestión, funciona como enmienda orgánica rica en nutrientes, que suele contener nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica, y contribuye a mejorar la salud del suelo y la actividad microbiana. El producto menos explorado pero prometedor de la tecnología BSF **es el quitosano**, que es una proteína derivada de la quitina presente en el exoesqueleto de las larvas. Este biopolímero versátil tiene aplicaciones en biomedicina, agentes antimicrobianos y cosméticos. Fuentes: (1), (5), (89), (90)

CONSIDERACIONES SOBRE LA ENTRADA DE RESIDUOS

Técnicamente, las BSF pueden alimentarse tanto con materiales orgánicos como con subproductos animales, aunque el uso de subproductos animales no está permitido en todas partes (véanse los requisitos técnicos).

Todos los materiales orgánicos deben estar limpios, con preferencia por los residuos procedentes de frutas, verduras y cereales. A pequeña escala, los residuos de cocina son adecuados. A mediana escala, las fuentes incluyen mercados, restaurantes y procesadores de alimentos, donde la clasificación y un suministro constante son esenciales. A escala industrial, los sistemas de BSF pueden procesar residuos orgánicos municipales, residuos de mercados y subproductos de la agroindustria, pero requieren contratos estables, protocolos de separación claros y una logística coordinada para garantizar insumos consistentes, equilibrados y no contaminados. Las BSF podrían criarse en instalaciones especializadas, y las larvas jóvenes distribuirse a los generadores de residuos para su tratamiento in situ, minimizando el transporte de residuos.

INVOLUCRAMIENTO COMUNITARIO

Apoya las iniciativas comunitarias fomentando la recogida selectiva de residuos orgánicos, que se entregan a los criadores locales de BSF para que produzcan proteínas y frass para uso local. El reparto de los ingresos y la menor dependencia de proteínas y fertilizantes importados refuerzan estos modelos. El BSF también puede utilizarse directamente en los lugares de generación de residuos alimentarios, lo que permite el tratamiento local de los residuos y beneficia a las comunidades cercanas; por ejemplo, en el recinto de una universidad que gestiona una gran cantina, los residuos alimentarios pueden tratarse localmente, mientras que los desechos pueden utilizarse para el cultivo local de hortalizas y las larvas pueden distribuirse a las comunidades cercanas para sus pollos. La cría centralizada con distribución local de larvas ofrece más oportunidades de participación comunitaria y beneficio mutuo.



Digestión anaeróbica

DEFINICIÓN

La digestión anaeróbica (DA) es una tecnología de tratamiento de residuos orgánicos -como restos de comida y lodos- en la que las bacterias y otros microorganismos descomponen los materiales orgánicos en ausencia de oxígeno.

Fuentes: (46), (51)

PRODUCTOS

Biogás: compuesto normalmente por un 50-70% de metano (CH_4), un 30-40% de dióxido de carbono (CO_2) y gases traza como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el amoníaco (NH_3). Tras la desulfuración y la eliminación de la humedad, puede utilizarse directamente para calefacción, iluminación, y electricidad. Cuando se produce a gran escala, puede convertirse en biometano (con un contenido de CH_4 superior al 95%) para ser inyectado en la red de gas o utilizarlo como combustible para vehículos. Para aplicaciones en vehículos, el biometano debe someterse a una purificación y densificación adicionales para cumplir las normas sobre combustibles. **Digestato:** rico en nitrógeno, fósforo, potasio y carbono orgánico, puede utilizarse como fertilizante líquido o sólido, mejorando la fertilidad del suelo, la biomasa microbiana, ayuda a retener la humedad y el ciclo de nutrientes. Fuentes: (46), (51)

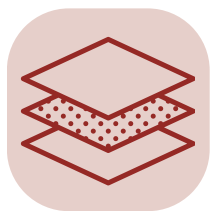
CONSIDERACIONES SOBRE LA ENTRADA DE RESIDUOS

Todos los materiales orgánicos deben separarse en origen y estar libres de productos químicos y contaminantes para garantizar un procesamiento eficaz y un digestato limpio apto para la agricultura.

A pequeña escala, los insumos adecuados incluyen restos de comida, residuos orgánicos como carne y pescado de hogares y mercados callejeros, excrementos humanos y estiércol, tolerándose pequeñas cantidades de grasas y lácteos. A mediana escala, se utilizan productos orgánicos como residuos de frutas y verduras o productos caducados, haciendo hincapié en la consistencia y la baja contaminación. A gran escala, los biodigestores procesan residuos orgánicos procedentes de programas municipales, agroindustrias y fabricantes de alimentos, lo que requiere un estricto cribado y pretratamiento para mantener el rendimiento y la seguridad del sistema. La digestión anaeróbica se considera un proceso seguro en el que no pueden sobrevivir agentes patógenos.

INVOLUCRAMIENTO COMUNITARIO

Demostrar ventajas tangibles - como energía limpia, fertilizantes y oportunidades económicas locales- motiva aún más la participación de la comunidad y ayuda a garantizar el éxito a largo plazo de estos proyectos. El compromiso sostenido depende de una formación clara, un diseño fácil de usar, mantenimiento y apoyo técnico. Fuentes: (51), (52), (53)



BioCubierta

DEFINICIÓN

Los sistemas de cobertura a base de compost o tierra, conocidos como biocubierta, están diseñados para mejorar la oxidación microbiana de las emisiones de metano de los rellenos sanitarios.

Estos sistemas pasivos se colocan sobre celdas de relleno envejecidas o de bajo rendimiento como sustituto de la recogida convencional de gases de relleno sanitario. Las biocubiertas ofrecen una solución para reducir las emisiones de metano de los rellenos sanitarios existentes, complementando estrategias más amplias de desvío de residuos. Normalmente, una biocubierta consiste en una capa de distribución de gas y una capa de oxidación de metano, normalmente hecha de compost maduro y otros materiales locales. Fuentes: (55), (56), (57), (58)

RESULTADOS

Oxidación del metano y reducción de las emisiones.

A medida que el gas del relleno sanitario se difunde a través de la biocubierta, las bacterias metanotróficas oxidan biológicamente el metano (CH_4) y lo convierten en dióxido de carbono (CO_2), lo que reduce significativamente el impacto global de los gases de efecto invernadero. Los sistemas bien diseñados consiguen eficacias de eliminación de CH_4 de entre el 70% y el 100%. Además, las cubiertas a base de compost pueden secuestrar carbono y mantener comunidades microbianas aerobias que estabilizan el nitrógeno. Las emisiones de óxido nitroso (N_2O) suelen ser mínimas -menos del 2,3% del beneficio equivalente en CO_2 - cuando se utiliza compost maduro y bien aireado. Fuentes: (56), (57), (58)



CONSIDERACIONES SOBRE LA ENTRADA DE RESIDUOS

Comúnmente compost o tierra, ambos ricos en contenido microbiano, para potenciar la oxidación del metano.






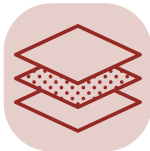


INVOLUCRAMIENTO COMUNITARIO

La participación es indirecta pero esencial para generar confianza y concienciar. Implicar a las partes interesadas locales en los procesos de ubicación y control permite a los agentes participar activamente en la garantía del correcto funcionamiento de los rellenos sanitarios. Esto no sólo mejora la percepción pública de la gestión de los rellenos sanitarios, sino que también refuerza el apoyo a la acción por el clima y a la eliminación progresiva de los rellenos sanitarios. Fuentes: (57), (58), (59)



Tiempo de Tratamiento (De menor a mayor)

	PEQUEÑA ESCALA	MEDIANA ESCALA	GRAN ESCALA
 Alimentación animal	Uso inmediato (diario si está fresco y almacenado)	24-48 horas; Debe procesarse (por ejemplo, cocinarse) para evitar que se estropee	24-48 horas (deshidratación/esterilización); 3-10 días (fermentación)
 Mosca Soldado Negra	10-15 días (bioconversión); ~40 días (ciclo completo)* puede variar en función de las condiciones locales	10-15 días (bioconversión); 40-45 días (ciclo completo) puede variar según las condiciones locales	10-15 días (bioconversión); 40-45 días (ciclo completo) puede variar en función de las condiciones locales
 Digestión anaeróbica	15-30 días; se recomienda la alimentación diaria	20-30 días tiempo de retención hidráulica; funciona mejor con alimentación diaria o semicontinua	20-40 días con alimentación continua o discontinua para mantener la estabilidad de la producción
 Vermicompostaje	45-60 días (cosecha parcial después de 3-4 semanas)	30-60 días (activo) + 1-2 semanas de curado	30-50 días (activo); 60-75 días (total incluyendo el curado)
 Compostaje	1-4 meses (gestión activa); hasta 24 semanas (sistemas pasivos)	8-16 semanas en total, incluyendo 2-4 semanas de descomposición activa y una fase de maduración	10-16 semanas. 3-4 semanas activas, 6-12 semanas de maduración
 BioCubierta	No aplica	No aplica	Funciona de forma pasiva/continua durante años; la oxidación del metano sigue siendo efectiva con las condiciones adecuadas del compost



Pequeña escala



Alimentación animal

Algunas jurisdicciones permiten la alimentación directa sin procesamiento, pero el almacenamiento seguro, la exclusión de material en mal estado y la higiene deben seguir siendo prioritarios. Fuentes: (33), (36)



Compostaje

A menudo poco o nada regulado, especialmente para el compostaje in situ no comercial. Las normas locales pueden referirse a la zonificación, el control de olores, la gestión de plagas y la distancia a los vecinos o a las fuentes de agua. El compostaje comunitario de varios hogares puede requerir registro o notificación. Evitar la carne y los productos lácteos ayuda a mantenerse por debajo de los umbrales de autorización y reduce la carga normativa. Se aconseja documentar los procesos para garantizar la transparencia con los vecinos. Fuentes: (22), (25), (31)



Vermicompostaje

Normalmente no está regulado, sobre todo si los residuos se generan y tratan in situ. Las normas locales pueden referirse al control de olores, la prevención de plagas, el drenaje y las restricciones sobre residuos orgánicos o compostaje en zonas residenciales. La venta de vermicompost o lombrices puede dar lugar a normativas relacionadas con enmiendas orgánicas, fertilizantes o alimentos. Fuentes: (8), (13), (17)



Mosca Soldado Negra

A menudo no regulada o ligeramente regulada. Las normas locales pueden asimilar la cría de la mosca negra soldado a la ganadería, la manipulación de residuos o la agricultura. Los sistemas de patio trasero pueden enfrentarse a inspecciones sanitarias o de molestias por olores, moscas o proximidad de vecinos. Puede ser necesario registrarse como pequeño generador de residuos o unidad de compostaje. La venta de larvas o excrementos se realiza a nivel local y puede dar lugar a normativas sobre etiquetado, seguridad o alimentación animal, dependiendo de la ubicación. Fuentes: (1), (3), (4)



Digestión anaeróbica

A menudo poco regulada o exenta de permisos formales cuando se utiliza in situ y fuera de la red (por ejemplo, unidades domésticas o agrícolas). Pueden aplicarse directrices de construcción y seguridad debido al almacenamiento de gas y los riesgos de combustión (ventilación y eliminación de H₂S). La proximidad de vecinos puede dar lugar a normas sobre molestias u olores. La aplicación de digestato a la tierra debe seguir las directrices agrícolas básicas, especialmente en el caso de las verduras que se comen crudas. La venta de biogás o digestato puede requerir el cumplimiento de la normativa sobre seguridad energética o sobre fertilizantes y enmiendas del suelo. Fuentes: (46), (53)



BioCubierta

No aplica



Mediana escala



Alimentación animal

Las empresas deben obtener permisos para tratar térmicamente los residuos de origen animal y licencias para operar como proveedores de alimentos. Por ejemplo, la legislación estadounidense exige que los restos que contengan carne se hiervan a 100 °C durante 30 minutos en instalaciones autorizadas. Las leyes estatales o locales pueden imponer normas más estrictas, incluidas inspecciones y mantenimiento de registros. Es necesario cumplir con las autoridades nacionales y locales, especialmente en el caso de los residuos alimentarios de origen comercial o externo. Fuentes: (33), (34)



Compostaje

Suelen requerir permisos formales de las autoridades locales o regionales, incluida la autorización de zonificación y permisos para procesar productos orgánicos separados en origen. Deben demostrar que controlan los olores y los lixiviados, las zonas de amortiguamiento y los planes detallados de drenaje y control de la erosión. El compost debe cumplir normas de calidad que limiten los patógenos, los metales pesados y los materiales inertes. Las normativas varían, pero suelen seguir marcos basados en el riesgo o en las mejores prácticas y la supervisión. Fuentes: (21), (31), (30)



Vermicompostaje

Es más probable que se requieran permisos municipales para la manipulación de residuos, sobre todo si se aceptan aportaciones de fuentes externas como mercados o instituciones. Las autoridades sanitarias y medioambientales pueden imponer medidas de control de olores, lixiviados y vectores. La venta de vermicompost o vermilachato implica el cumplimiento de normas de etiquetado y calidad. Se recomienda una coordinación temprana con los organismos reguladores. Fuentes: (11), (12), (16), (17)



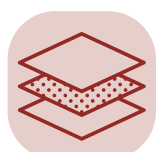
Mosca Soldado Negra

Es necesario confirmar si la bioconversión de insectos entra dentro de la legislación sobre residuos, alimentos o agricultura. A menudo se necesitan permisos de manipulación de residuos, zonificación y salud medioambiental. La venta comercial de larvas o excrementos debe cumplir las normas sobre alimento y fertilizantes orgánicos. Es posible que se solapen las normas de los sectores de salud, agricultura y residuos, por lo que se aconseja coordinarse de manera temprana con las autoridades. Fuentes: (1), (3), (4)



Digestión anaeróbica

Suele requerir permisos formales de las autoridades municipales o medioambientales, incluidos permisos de funcionamiento, aprobación de zonificación y, posiblemente, licencias de procesamiento de residuos o de energía, especialmente si se aceptan residuos alimentarios de terceros. Las zonas ATEX (certificación europea para equipos seguros de usar en atmósferas explosivas) adquieren una relevancia crucial a esta escala. Los requisitos normativos suelen incluir formación operativa, evaluaciones de impacto ambiental, planes de gestión del biogás, control de olores y lixiviados, gestión del digestato, quema de biogás y trazabilidad de la materia prima. Fuentes: (46), (47), (51)



BioCubierta

No aplica



Gran escala



Alimentación animal

Las operaciones de conversión de residuos alimentarios en alimento animal requieren licencias para la transformación y el tratamiento térmico de los restos de alimentos de origen animal. Las instalaciones deben cumplir las normas de seguridad alimentaria, mantener la trazabilidad y etiquetar correctamente, especialmente en lo que respecta a las restricciones de proteínas de mamíferos para rumiantes. Otras normativas son los permisos medioambientales, las normas de manipulación de residuos y la separación de los residuos no tratados. El solapamiento de las normativas sobre residuos y alimentos puede complicar su cumplimiento y aumentar los costes, por lo que es importante armonizar las licencias para evitar redundancias. Fuentes: (33), (34)



Compostaje

Sujetas a normativas estrictas debido a su escala e impacto ambiental. Los permisos incluyen autorizaciones medioambientales, licencias de tratamiento de residuos sólidos y cumplimiento de la zonificación. Requiere sistemas integrales de control de lixiviados, olores y contaminación atmosférica, prevención de la erosión y amplias zonas de amortiguamiento respecto a residencias y masas de agua. El compost acabado debe cumplir estrictas normas de seguridad. Se aplican restricciones de entrada a los materiales peligrosos o contaminados. Las normativas se basan en el riesgo, la no degradación neta o las mejores normas posibles, según la jurisdicción. Fuentes: (30), (31)



Vermicompostaje

Requiere permisos para el tratamiento de residuos, la protección del medio ambiente y la salud pública. Las obligaciones incluyen la gestión de lixiviados, el control de olores, las zonas de amortiguamiento y las evaluaciones de impacto ambiental. La producción comercial debe cumplir las normas nacionales sobre fertilizantes orgánicos. Los grandes sistemas suelen utilizar materias primas controladas (subproductos agroindustriales o estiércol) para garantizar la coherencia y minimizar la contaminación. Fuentes: (12), (14), (16)



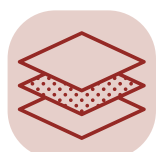
Mosca Soldado Negra

Deben cumplir íntegramente la legislación nacional, lo que exige múltiples permisos, como tratamiento de residuos sólidos, producción de alimento, normas sobre enmiendas del suelo, evaluaciones de impacto ambiental, salud laboral y zonificación. Los productos (larvas, aceite, desechos) deben cumplir normas de calidad para poder entrar en el mercado. La normativa suele implicar a varios ministerios (salud, agricultura, medio ambiente, industria). Las operaciones de exportación deben cumplir las normas internacionales (por ejemplo, UE, Codex) de trazabilidad y seguridad. La debida diligencia legal es esencial. Fuentes: (2), (3), (5)



Digestión anaeróbica

Sujeta a una regulación exhaustiva con múltiples permisos de impacto ambiental, zonas ATEX (certificación europea de equipos seguros para su uso en atmósferas explosivas), generación de energía, procesamiento de residuos orgánicos y control de emisiones. Las instalaciones deben demostrar que controlan las emisiones de metano, los olores, el ruido y los efluentes, y mantener sistemas de ingeniería para la captura de biogás, la seguridad de las antorchas y el almacenamiento de digestato. La venta o aplicación en tierra del digestato requiere el cumplimiento de normas de seguridad. Es necesario coordinar las normativas sobre residuos, energía y agricultura para evitar solapamientos. Fuentes: (46), (47), (51)



BioCubierta

Las biocubiertas suelen requerir la aprobación de las autoridades medioambientales, especialmente para el cierre de rellenos sanitarios o la mitigación del metano, ya que estos usos están estrechamente ligados a la protección del medio ambiente a largo plazo y al cumplimiento de la normativa. Como parte de la cubierta final del relleno sanitario, las biocubiertas deben cumplir normas estrictas de control de emisiones y salud pública. Los permisos suelen exigir evaluaciones del flujo de metano, diseños documentados, seguimiento a largo plazo y cumplimiento de la normativa sobre calidad del aire y clima. El compost utilizado debe cumplir normas de seguridad, y las autoridades también pueden evaluar las emisiones secundarias y exigir la mejor tecnología disponible. Fuentes: (56), (57), (59), (91), (92)



Pequeña escala



Alimentación animal

Necesita menos de 5m² para la recogida, clasificación, almacenamiento y alimentación directa. Los residuos de alimentos se clasifican manualmente, prestando atención a la humedad para evitar que se estropeen. El consumo de energía es bajo, principalmente refrigeración o secado simple. El transporte es informal y se basa en cadenas de suministro cortas cerca del ganado para reducir el deterioro y los costes. La higiene se mantiene mediante la exclusión de plagas y la protección frente al clima. Fuentes: (22), (24)



Compostaje

Utiliza contenedores sencillos (de plástico, arcilla, madera) que permiten la circulación de aire y el drenaje, o apila directamente en el suelo. Herramientas manuales como horquillas o volteadores ayudan a controlar el olor y las plagas. El consumo de energía es mínimo o insignificante, y los cubos se colocan cerca de la cocina o el jardín para mayor comodidad. No es necesario el transporte, ya que el compostaje se realiza in situ. Los factores clave para un funcionamiento eficaz son la separación en origen, la aireación y el control de la humedad. Requiere hasta 1-2m² para un hogar, y proporcionalmente más espacio para las escuelas. Fuentes: (20), (21), (31)



Vermicompostaje

Construido a partir de materiales locales o contenedores comerciales, requiere cubiertas, drenaje y aireación. No se necesita maquinaria; sólo requiere alimentación y recolección manual. El uso de energía es insignificante. Las lombrices necesitan una siembra inicial sana y protección contra los depredadores. Suelen situarse cerca de las fuentes de residuos, por lo que el transporte es mínimo. Adecuada para patios traseros o interiores de hasta 1-3m². En climas más fríos, se necesita abrigo o aislamiento. Fuentes: (8), (13), (17), (18).



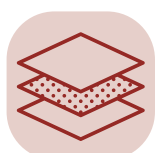
Mosca Soldado Negra

Se necesita una infraestructura mínima utilizando materiales locales; hay que tener en cuenta el alojamiento y la calefacción. Las instalaciones domésticas dan prioridad a los diseños compactos y de bajo mantenimiento. Es esencial el acceso a larvas iniciadoras neonatas ("semilla"); también pueden encontrarse larvas silvestres localmente existentes en rellenos sanitarios y utilizarse para establecer una nueva colonia. La auto cosecha pasiva reduce la mano de obra. El espacio requerido es de unos pocos metros cuadrados, lo que la hace adecuada para patios traseros o pequeños contenedores. La cría in situ es posible, pero a menudo menos controlada, por lo que las edades de las larvas difieren y hacen más difícil alcanzar una alta eficiencia en las tasas de bioconversión y supervivencia. Las granjas de BSF a pequeña escala utilizan residuos limpios de origen local, con suficiente clasificación y trituración manual. Fuentes: (1), (4), (6)



Digestión anaeróbica

Se requiere una infraestructura mínima con biodigestores prefabricados de plástico o fibra de vidrio, o cúpulas fijas de mampostería equipadas con válvulas de entrada/salida, cúpulas o bolsas selladas de recogida de biogás y tuberías sencillas para estufas, calentadores de agua o lámparas. No se necesita electricidad a menos que se añadan componentes opcionales, como bombas, sopladores o trituradoras. Es pasiva en climas cálidos; puede requerir aislamiento o calefacción en zonas frías. La materia prima se trata in situ, por lo que no es necesario transportarla. Basta con la alimentación manual y una mezcla básica de agua. Suele colocarse cerca de cocinas o jardines, necesitando entre 2 y 6 m² de espacio. Fuentes: (51), (53)



BioCubierta

No aplica



Mediana escala



Alimentación animal

Requiere 100-300m² para la recepción, el preprocesamiento, el almacenamiento y la cocción o deshidratación. Utiliza tecnologías avanzadas como la deshidratación, el peletizado y la extrusión para producir alimentos consistentes y seguros. La demanda de energía es alta, sobre todo para el secado. El almacenamiento en frío y el transporte refrigerado son fundamentales para alargar las cadenas de suministro. La materia prima es más limpia y uniforme, a menudo de origen agroindustrial, lo que favorece la estabilidad de las operaciones. Fuentes: (33), (44)



Compostaje

Utiliza hileras o pilas estáticas aireadas, a menudo con trituradoras, cargadoras y volteadoras mecanizadas. Se requiere un uso moderado de energía para la aireación, la lixiviación y el control de olores. Los residuos se transportan, clasifican y humidifican. Requiere entre 500 y 1.500m², incluidas las zonas de recepción, compostaje activo y curado. En cambio, los sistemas de compostaje en contenedores (in-vessel) utilizan reactores cerrados con control automático de la aireación y la temperatura, por lo que requieren menos espacio y permiten una gestión más eficaz del proceso. Fuentes: (30), (31), (33), (93)



Vermicompostaje

Disposición estructurada con zonas de alimentación, cosecha y curado, a menudo lechos de hormigón o mampostería. Es necesario un tratamiento previo de los residuos (trituración, clasificación) para eliminar los insumos inadecuados, como la carne, los productos lácteos o los cítricos. Puede ser útil cierta mecanización (tamizadoras, trituradoras), pero los procesos principales siguen siendo manuales. Requiere protección contra la intemperie y las plagas. El consumo de energía es bajo, principalmente para herramientas, agua e iluminación. Normalmente necesita 50-200m² con infraestructura cubierta/sombreada. Puede ser necesario el transporte de insumos y productos. Fuentes: (11), (12), (13), (16), (17), (18)



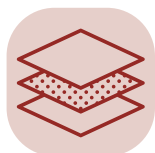
Mosca Soldado Negra

Requiere una infraestructura estructurada con logística separada para la cría de larvas, la separación de pupas y la manipulación de residuos. Los residuos deben ser preprocesados (clasificación, trituración). El control de la temperatura, la humedad y la luz es vital para un buen funcionamiento; puede ser necesario un control climático. Las colonias de iniciación y los protocolos de mantenimiento de las colonias son cruciales. Se requiere bioseguridad, drenaje y gestión de lixiviados. El uso moderado de energía depende de la capacidad. El diseño del emplazamiento debe tener en cuenta los olores y el cumplimiento de la normativa. El espacio necesario es de unos 100-300m² para un rendimiento de 0,5-3 toneladas/día. Fuentes: (1), (2), (3)



Digestión anaeróbica

Requiere una infraestructura estructurada con zonas para la recepción de la materia prima, la clasificación, la homogeneización (trituradoras, mezcladoras), la biodigestión, el aprovechamiento del biogás y el almacenamiento del digestato. Los digestores son de cúpula fija, CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), lagunas cubiertas o de flujo taponado, con bombas, válvulas y unidades de recuperación de calor/energía. Se necesita energía para mezclar, calentar y controlar. Es esencial controlar el drenaje, los olores y los lixiviados. La proximidad a las fuentes de materias primas reduce el tiempo de transporte. Requiere un espacio de 200-1.000m² que incluye zonas de almacenamiento, amortiguación y equipamiento. Fuentes: (46), (47), (52)



BioCubierta

No aplica



Gran escala



Alimentación animal

Necesita más de 2.000m² con recepción cubierta, clasificación, almacenamiento (en seco y en frío) y múltiples fases de procesamiento, como secado, peletización y fermentación. Son esenciales unos elevados insumos energéticos y estrictos controles de higiene. El suministro continuo de materias primas limpias y homogéneas es fundamental. Una logística eficiente con transporte refrigerado puede gestionar grandes volúmenes. Fuentes: (26), (33), (35)



Compostaje

Emplea sistemas mecanizados como hileras, pilas aireadas o compostaje en contenedores con equipos industriales. Los sistemas en contenedores consumen más energía pero ofrecen un mejor control. Las instalaciones abarcan de 2 a 5 hectáreas con recepción, procesamiento, gestión de lixiviados, carreteras y servicios auxiliares. El diseño tiene en cuenta la logística del transporte, la fluidez del tráfico y los contratiempos reglamentarios. Fuentes: (22), (31), (30)



Vermicompostaje

Se necesitan instalaciones industriales con recepción de materias primas, pretratamiento, lechos o pilas de compostaje, curado y zonas de almacenamiento. Los insumos deben ser homogéneos y pretratados; los materiales inadecuados deben excluirse. Las instalaciones deben estar cubiertas o cerradas para regular la temperatura, la humedad y los lixiviados. Las operaciones se apoyan en cierta mecanización, aunque la descomposición es un proceso biológico. El consumo de energía es modesto y está vinculado al equipo y al suministro de agua. Requiere un espacio operativo de 4.000-8.000m² más zonas adicionales de amortiguación y acceso de hasta 10.000-15.000m² en total. La logística de transporte de insumos y productos es crítica. Fuentes: (12), (14), (16), (17)



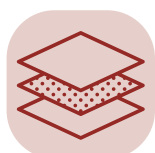
Mosca Soldado Negra

Las instalaciones industriales cuentan con pre tratamiento automatizado de residuos, cría de larvas y separación. El control climático garantiza la productividad en varias zonas. La consistencia de la calidad de la materia prima suele garantizarse mediante contratos. Las instalaciones están diseñadas para operaciones de flujo continuo con control de lixiviados, olores, bioseguridad y conformidad. Se requiere un espacio dedicado a la cría con fotoperíodos controlados y personal cualificado para la genética de las colonias. El espacio necesario oscila entre 2.500 y 5.000m² de superficie neta, y entre 6.000 y 15.000m² si se incluyen las zonas de acceso y amortiguación. Fuentes: (2), (3), (5)



Digestión anaeróbica

Requiere una infraestructura industrial con sistemas automatizados de clasificación de materias primas, trituración, preparación de lodos y alimentación continua. Los grandes digestores CSTR o modulares plug-flow integran calefacción, agitación y monitorización en tiempo real. Las instalaciones incluyen tratamiento del biogás (por ejemplo, desulfuración), control de olores y lixiviados, y recuperación de energía mediante cogeneración o unidades de mejora. El suministro de materia prima se garantiza mediante contratos. Debe cumplir las normas medioambientales y de seguridad industrial. Requiere entre 6.000 y 15.000m² de espacio para digestores, almacenamiento, flujo de tráfico y zonas de amortiguación. Fuentes: (46), (47), (49)



BioCubierta

Los sistemas de biocubierta a gran escala requieren una infraestructura de relleno sanitario diseñada con una capa de distribución de gas (por ejemplo, grava) bajo una capa de oxidación a base de compost o tierra. La construcción requiere excavadoras y compactadoras para dar forma y estratificar el sistema. Aunque las cubiertas biológicas funcionan de forma pasiva sin aporte de energía, su control puede realizarse mediante analizadores de gases y cámaras de flujo. El transporte se limita a la entrega inicial de material. El espacio necesario oscila entre miles y decenas de miles de metros cuadrados, cubriendo celdas de relleno sanitario completas o zonas de altas emisiones. Fuentes: (56), (57), (59)



Aspectos Medioambientales: Reducción del metano



Alimentación animal

Puede reducir significativamente el impacto ambiental asociado a la producción convencional de alimento y a la eliminación de residuos. Desviar los restos de comida de los rellenos sanitarios reduce las emisiones de metano, mientras que desplazar cultivos para alimentos como el maíz y la soja reduce la demanda de agua, fertilizantes y tierras. Los estudios demuestran que supera a la digestión anaeróbica y el compostaje en reducción de gases de efecto invernadero y eficiencia energética. Los resultados medioambientales dependen de la logística y los métodos de transformación. Fuentes: (31), (36), (44)



Compostaje

Reduce las emisiones de metano al evitar la descomposición anaeróbica en los rellenos sanitarios. Supone una media del 78% de las emisiones de metano que normalmente liberarían los rellenos sanitarios, lo que representa una reducción significativa de las emisiones del sector de los residuos. El compost también añade materia orgánica que mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, reduciendo la dependencia de los fertilizantes químicos y favoreciendo la salud del suelo a largo plazo. Cuando se sitúa cerca de las fuentes de residuos, el compostaje reduce aún más las emisiones procedentes del transporte, reforzando su contribución medioambiental. Como enmienda del suelo rica en carbono, el compost también mejora el secuestro de carbono al estimular los procesos biológicos que almacenan una parte del carbono en el suelo y en la biomasa subterránea, ayudando a mitigar el cambio climático. Fuentes: (20), (22), (31), (61)



Vermi compostaje

Desvía los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios y puede reducir las emisiones de metano hasta en un 50-60% en comparación con la eliminación en rellenos sanitarios. Aunque es más lento que el compostaje termofílico o el BSF, el proceso aeróbico a baja temperatura evita la descomposición anaeróbica, con lo que las emisiones directas de gases de efecto invernadero son mínimas. Otras ventajas son la mejora del contenido de carbono del suelo cuando se aplica vermicompost a la tierra, la reducción del uso de fertilizantes sintéticos y el aumento de la biodiversidad microbiana en los suelos tratados. Si se aplica cerca de las fuentes de residuos, se pueden reducir aún más las emisiones derivadas del transporte. Fuentes: (12), (14), (16)



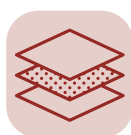
Mosca Soldado Negra

Puede reducir el volumen de residuos orgánicos hasta en un 80%, reduciendo las emisiones de metano entre un 50 y un 90% en comparación con el compostaje o el vertido, respectivamente. Esta reducción se debe a la rápida digestión de los sustratos por parte de las larvas, que evita la descomposición anaeróbica generadora de metano. Un estudio revisado por expertos sobre el tratamiento del estiércol de ganado descubrió una reducción de hasta el 87% en las emisiones de metano utilizando larvas de BSF. La ubicación de las instalaciones cerca de las fuentes de residuos también reduce las emisiones procedentes del transporte. Otras ventajas son la reducción de los lixiviados, el uso mínimo del suelo y la recuperación de nutrientes como alimentación animal y enmienda del suelo. Fuentes: (2), (3), (5), (7)



Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica controlada en plantas de biogás o biodigestores optimiza la descomposición de los residuos alimentarios en entornos cerrados, reduciendo significativamente las emisiones de metano, los lixiviados y los olores que, de otro modo, se derivarían de la eliminación incontrolada en rellenos sanitarios. Cuando el biogás o el biometano desplazan a los combustibles fósiles para cocinar, calentar, generar electricidad, cubrir las necesidades energéticas industriales o como combustible para vehículos, se consiguen mayores reducciones de emisiones. La aplicación de digestato mejora la fertilidad del suelo y reduce la dependencia de los fertilizantes sintéticos, disminuyendo las emisiones indirectas de la producción de fertilizantes. La ubicación conjunta de los sistemas cerca de los generadores de residuos y la planificación de una gestión descentralizada minimizan las emisiones relacionadas con el transporte, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y al uso local de los recursos. Fuentes: (46), (47), (51)



BioCubierta

Reducen las emisiones de metano de los rellenos sanitarios en un 60-100% mediante la oxidación microbiana, convirtiendo el CH₄ en CO₂, un gas con un potencial de calentamiento global mucho menor. A diferencia de la quema en antorcha, las biocubiertas funcionan de forma pasiva sin subproductos de combustión. Los estudios de campo muestran un rendimiento a largo plazo sin degradación significativa, incluso en climas fríos. Cuando se utiliza compost maduro, las emisiones de óxido nítrico siguen siendo insignificantes, lo que garantiza un elevado beneficio climático neto. Las biocubiertas también evitan las demandas de infraestructura de los sistemas de extracción de gas y energía, lo que los hace adecuados para emplazamientos envejecidos o remotos. La aplicación de las biocubiertas in situ minimiza las alteraciones medioambientales y reduce las emisiones derivadas del transporte de materiales. Fuentes: (56), (57), (58), (59), (60)



Pequeña escala



Alimentación animal

Inversión mínima, ya que los restos de comida reducen los costes de alimentación y eliminación, especialmente en zonas rurales o periurbanas con servicios de residuos limitados. El uso in situ también fomenta la soberanía alimentaria y mejora la eficiencia de los recursos locales. Fuentes: (34)



Compostaje

El compostaje a pequeña escala, descentralizado y **de bajo coste, ahorra en transporte y eliminación**. Construido con materiales locales o comerciales, ofrece beneficios financieros principalmente a través de los costes evitados. La eficiencia mejora con la educación de los hogares y una fuerte participación de la comunidad. Fuentes: (22), (31)



Vermicompostaje

El vermicompostaje a pequeña escala, **accesible y de bajo coste**, reduce los residuos domésticos y las tasas de vertido, al tiempo que produce compost para jardinería. El stock inicial de lombrices (*Eisenia foetida*) puede ser costoso y difícil de conseguir. Es económicamente viable sobre todo por los costes evitados y las ayudas municipales. Fuentes: (8), (13), (16), (18)



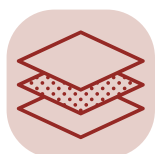
Mosca Soldado Negra

Baratos y accesibles, los sistemas BSF a pequeña escala reducen las necesidades municipales de recogida y transporte de residuos. El principal beneficio económico radica en los costes evitados, lo que podría justificar las subvenciones en zonas con un alto nivel de residuos orgánicos. Fuentes: (1), (3), (4)



Digestión anaeróbica

Los biodigestores domésticos o a escala agrícola son **de bajo coste y reducen los gastos en combustible y fertilizantes**. También reducen las necesidades de recogida de residuos municipales, sobre todo en las zonas rurales. El ahorro de costes puede justificar el apoyo a través de programas energéticos, sanitarios o climáticos. Fuentes: (51), (53)



BioCubierta

No aplica



Mediana escala



Alimentación animal

Reduce los costes de transporte, eliminación y alimentación. Sin embargo, si se necesita tratamiento (por ejemplo, deshidratación), los costes pueden duplicarse en comparación con otros métodos. **El éxito depende de la logística**, la proximidad a las granjas y la limpieza de las materias primas. Fuentes: (3), (8)



Compostaje

Ahorro en transporte y tasas de vertido. Es rentable para los municipios, aunque las ventas de compost rara vez cubren los costes. El éxito financiero depende de la limpieza de los insumos, la proximidad de los usuarios, la participación temprana de los agricultores y una planificación clara del mercado. Se pueden aplicar modelos público-privados o municipales. Fuentes: (21), (22), (31)



Vermicompostaje

Ahorro en transporte a rellenos sanitarios y tasas de vertido. Apoya las soluciones locales en materia de residuos, pero ofrece beneficios limitados. El compost tiene escaso valor de mercado; el lixiviado del gusano puede generar algunos ingresos si se trata y comercializa adecuadamente. La viabilidad depende de unos costes bajos, una materia prima estable y el respaldo institucional. Fuentes: (11), (12), (13), (16)



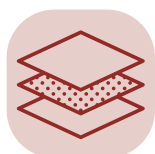
Mosca Soldado Negra

Los municipios ahorran en transporte y vertido, y obtienen ingresos de las larvas, los desechos y el aceite. La viabilidad financiera depende de la estabilidad de las materias primas, de la existencia de mercados de producción claros y de una buena gestión. A menudo se utilizan modelos cooperativos o público-privados. Fuentes: (2), (3), (4)



Digestión anaeróbica

Requiere **una inversión moderada**, pero ofrece beneficios gracias a la reducción de los costes de eliminación, la producción de energía y la sustitución de fertilizantes. Los ingresos pueden proceder de las tasas de vertido o de los contratos de materias primas. La viabilidad mejora con insumos estables y acceso a subvenciones climáticas o energéticas. Fuentes: (47), (51), (52), (54)



BioCubierta

No aplica



Gran escala



Alimentación animal

Económicamente viable con una transformación eficaz y mercados seguros. A pesar de los elevados costes iniciales, el ahorro derivado de la producción de alimento, la reducción de las tasas de vertido y los ingresos potenciales pueden equilibrar las inversiones. La rentabilidad depende de la higiene, la fiabilidad de los insumos y la estabilidad del mercado. Fuentes: (34), (36)



Compostaje

Requiere grandes inversiones en infraestructuras y mano de obra. **La viabilidad depende de las tasas de vertido y de unos residuos limpios y separados en origen.** Las ventas de compost por sí solas son insuficientes; es esencial desarrollar mercados locales y asegurarse clientes desde el principio, ya que producir un producto que no se puede vender socava todo el esfuerzo. Fuentes: (22), (31)



Vermicompostaje

Costes **elevados** de **infraestructura y mano de obra**. El compost y los lixiviados rara vez cubren los gastos. La rentabilidad es limitada sin incentivos políticos o modelos de economía circular. Más adecuado para operaciones públicas o subvencionadas. Fuentes: (12), (14), (16)



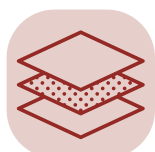
Mosca Soldado Negra

La inversión es elevada, pero proporciona múltiples fuentes de ingresos procedentes de las larvas, la enmienda del suelo y el aceite. Rentable para la mitigación del carbono y el desvío de rellenos sanitarios. El éxito depende de contratos a largo plazo, materias primas diversificadas y control de calidad en modelos público-privados o privados. Fuentes: (2), (3), (5)



Digestión anaeróbica

Costes iniciales elevados, pero se beneficia de las economías de escala. Los beneficios proceden de la venta de energía, las tasas de vertido y el digestato. El éxito financiero depende de la consistencia de la materia prima, del valor de mercado de los productos y del acceso a subvenciones. Fuente: (49)



BioCubierta

Opción asequible de mitigación del metano para los rellenos sanitarios heredados. No produce ingresos pero puede reducir las responsabilidades por emisiones y los incentivos políticos. Los costes clave incluyen la evaluación del emplazamiento, el transporte del compost y la instalación. El abastecimiento local de compost mantiene los costes bajos; el transporte a distancia los aumenta. La supervisión añade costes iniciales, pero las operaciones a largo plazo son pasivas y de bajo mantenimiento. El compost suele durar entre 5 y 7 años, por lo que su ciclo de vida es favorable desde el punto de vista económico. Fuentes: (56), (57), (58), (59)



Aspectos Económicos: Escalabilidad



Alimentación animal

Influida por la logística de la cadena de suministro, la tecnología y la demanda del mercado. Cuando las materias primas son homogéneas y se someten a un tratamiento previo (por ejemplo, secado térmico), los sistemas pueden ampliarse con una infraestructura adicional mínima que vaya más allá del secado, la trituración o el peletizado. Las operaciones industriales se benefician de la integración de los residuos alimentarios en las líneas de fabricación de alimentos existentes, reduciendo la dependencia de la tierra y el agua en comparación con los cultivos de alimentos básicos. Sin embargo, la contaminación, la variabilidad en la composición de los residuos y las restricciones normativas siguen siendo obstáculos para una adopción más amplia. El apoyo a las políticas, la colaboración entre el sector público y el privado y la estandarización de los protocolos de seguridad son fundamentales para garantizar una expansión segura y rentable: (34), (36)



Compostaje

Altamente escalable, desde contenedores domésticos hasta grandes sistemas industriales. La ampliación es sencilla: aumentar la superficie de compostaje, el volumen de entrada o el número de unidades de procesamiento. No requiere organismos especializados: los microbios están presentes de forma natural y son autosuficientes, lo que reduce las barreras técnicas. En los sistemas industriales o en regiones con temporadas de lluvias prolongadas, la escalabilidad puede depender del acceso a zonas cubiertas o protegidas, o de la inversión en cubiertas impermeables. Los sistemas de hileras y en recipientes pueden ampliarse con equipos y espacio. En todas las escalas, el éxito depende del suministro constante de materia prima, de la disposición del emplazamiento y de la planificación temprana de la distribución de la producción. Fuentes: (24), (30)



Vermi compostaje

Es escalable en operaciones pequeñas y medianas, pero presenta limitaciones a escala industrial. Su naturaleza de baja tecnología lo hace accesible a hogares, escuelas y cooperativas, y puede ampliarse modularmente. Sin embargo, a medida que aumenta la escala, también aumentan los problemas relacionados con la mano de obra, las necesidades de suelo, el control climático y la consistencia de la materia prima. A diferencia de la mosca soldado negra, que es rápida y compacta, el vermicompostaje es más lento, ocupa menos espacio y es más difícil de automatizar. Su principal producto -el compost- tiene un valor de mercado limitado a menos que forme parte de un sistema certificado o de marca. A pesar de estas limitaciones, el vermicompostaje sigue siendo una buena opción para los modelos circulares a escala comunitaria, especialmente cuando se priorizan los resultados sociales, agrícolas o educativos por encima del rendimiento rápido o el beneficio. Fuentes: (12), (13), (14)



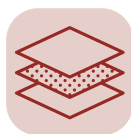
Mosca Soldado Negra

Intrinsecamente escalable, funciona eficazmente a nivel doméstico, medio e industrial. No requiere infraestructuras complejas, lo que la hace adaptable a diversos contextos y geografías. Se espera que las continuas mejoras en el diseño y la genética del sistema reduzcan los costes y mejoren los rendimientos. Los subproductos -larvas ricas en proteínas y fructosa densa en nutrientes- ya son valiosos en los mercados de alimentos y agrícolas, con potencial para obtener mayores márgenes a medida que se amplíen las políticas de bioeconomía circular. Sin embargo, el BSF se enfrentará a una competencia cada vez mayor de la fermentación de precisión y otras fuentes de proteínas de nueva generación. La viabilidad a largo plazo dependerá de su posicionamiento no sólo como solución proteínica, sino también como estrategia rentable y descentralizada de gestión de residuos. Fuentes: (2), (3), (5)



Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es altamente escalable y adaptable, y produce energía renovable y digestato rico en nutrientes. Sin embargo, el digestato a menudo requiere más compostaje para garantizar su seguridad y valor, ya que puede contener contaminantes como PFAS (sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas). Aunque se promueven con objetivos de economía circular, los sistemas de biogás se enfrentan a obstáculos económicos y técnicos, y pueden apoyar involuntariamente prácticas agrícolas intensivas. Los principios de justicia ambiental exigen una supervisión cuidadosa para prevenir la contaminación y garantizar que los beneficios lleguen a todas las comunidades, no sólo a los grandes operadores industriales. Fuentes: (46), (47), (51)



BioCubierta

Intrinsecamente escalables y adaptables a diversos contextos de relleno sanitario. Pueden instalarse en toda la superficie del relleno sanitario o en zonas específicas de altas emisiones, por lo que son adecuadas tanto para rellenos grandes como pequeños. Dado que se basan en la oxidación microbiana pasiva y en el compost de origen local, su implantación es factible sin grandes infraestructuras. La escalabilidad está más limitada por la disponibilidad de materiales y la distribución del metano en cada emplazamiento que por la complejidad técnica. Las cubiertas biológicas son especialmente adecuadas para rellenos sanitarios viejos o cerrados. Su naturaleza modular y su baja demanda energética favorecen su implantación gradual y su integración en las estrategias de gestión posterior al cierre. Fuentes: (56), (57), (59)



Alimentación animal

BARRERAS DE ENTRADA

● Bajo a moderado

✓ CAPACIDADES NECESARIAS

El personal debe conocer las restricciones normativas y garantizar la exclusión de materiales inseguros. En entornos industriales, la coordinación entre nutricionistas, tecnólogos de alimentos y operarios es esencial para mantener la consistencia de los alimentos, optimizar el uso de la energía e incorporar ingredientes alternativos de forma segura. Los operarios deben estar familiarizados con los sistemas informatizados, las Buenas Prácticas de Fabricación (BPF) y el Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico (APPC). La formación y la comunicación continuas mejoran el control del proceso y la calidad del producto. Fuente: (44)

👜 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO

Genera puestos de trabajo en la recogida, el transporte y la transformación, especialmente en entornos informales o descentralizados. Modelos como el de la Universidad de Rutgers muestran cómo las asociaciones locales con los agricultores crean empleo estable y oportunidades empresariales. Fuentes: (33), (44)



Compostaje

BARRERAS DE ENTRADA

● Bajo

✓ CAPACIDADES NECESARIAS

El funcionamiento de los sistemas de compostaje requiere diferentes niveles de formación del personal (desde el más básico hasta el más especializado) para gestionar la recogida de materiales contaminados, el equilibrio de la humedad, la aireación y el control de la temperatura. El personal debe saber cómo manejar las trituradoras, girar el equipo y controlar la madurez del compost. A todas las escalas, es esencial conocer las materias primas aceptables y los riesgos de contaminación. El personal municipal o los miembros de la comunidad pueden necesitar formación inicial y apoyo continuo para mantener los estándares de calidad y evitar olores, plagas o condiciones anaeróbicas. Fuentes: (31), (30)

👜 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO

Requiere mucha mano de obra y crea puestos de trabajo en la recogida, clasificación, procesamiento y comercialización. El compostaje a pequeña escala puede emplear a muchos más trabajadores por tonelada que el vertido o la incineración, apoyando a las economías locales y a las pequeñas empresas. El uso del compostaje para gestionar los residuos orgánicos genera una media de 6,6 empleos/10.000 TPY (toneladas por año). Fuentes: (24), (25), (86)



Vermi compostaje

BARRERAS DE ENTRADA

● Bajo

✓ CAPACIDADES NECESARIAS

Requiere conocimientos técnicos básicos pero una atención constante. Los operadores deben comprender la biología de las lombrices, las tasas de alimentación, la humedad, la temperatura y el control del pH. Las lombrices son más sensibles que los microbios del compost y pueden requerir una vigilancia más estrecha, especialmente en condiciones fluctuantes. A pequeña escala, la formación informal o las guías suelen ser suficientes. Los sistemas medianos y grandes exigen conocimientos más estructurados sobre la gestión de las materias primas, el control medioambiental y la calidad del producto. La experiencia práctica en compostaje u horticultura es útil. La formación municipal o la impartida por una organización no gubernamental (ONG) puede ser necesaria para desarrollar la capacidad en entornos comunitarios o cooperativos. Fuentes: (8), (12), (13), (16)

👛 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO

Fomenta la creación de empleo inclusivo a nivel comunitario a través de escuelas, cooperativas y barrios. Fomenta la educación medioambiental y la propiedad compartida de soluciones para los residuos, aunque el éxito depende del compromiso y la formación continuos. Fuentes: (12), (19)



Mosca soldado negra

BARRERAS DE ENTRADA

● Baja a moderada

✓ CAPACIDADES NECESARIAS

Se necesita formación básica para las operaciones habituales. Los usuarios deben conocer el ciclo de vida de la BSF, los requisitos de alimentación y las prácticas básicas de higiene. La mayoría de los sistemas pueden funcionar sin conocimientos técnicos, sobre todo si las larvas de inicio se obtienen externamente y la cría se subcontrata a instalaciones especializadas. Los talleres comunitarios o las guías visuales pueden apoyar la adopción. Los problemas más comunes son la mala selección de los residuos, la alimentación insuficiente o excesiva y el descuido de la humedad o el flujo de aire. La comercialización y los canales de distribución de los productos son esenciales para garantizar el flujo financiero. Existen múltiples guías de código abierto y una Comunidad de Práctica interactiva para el intercambio entre pares. Fuentes: (1), (4), (6)

👛 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO

Crea empleo a todas las escalas: desde la atención domiciliaria hasta funciones de clasificación, cría de larvas, alimentación, transporte y comercialización de productos. Ofrece una vía para formalizar empleos en la gestión de residuos orgánicos, sobre todo en zonas urbanas y periurbanas. Gracias a un mejor acceso a alimento para animales y mejoradores de la calidad del suelo, los agricultores obtendrán mejores rendimientos, lo que podría aumentar el empleo también en las zonas rurales. Fuentes: (2), (4), (6)



Digestión anaeróbica

BARRERAS DE ENTRADA

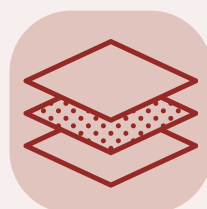
● Moderado

✓ CAPACIDADES NECESARIAS

El funcionamiento de los sistemas de digestión anaeróbica requiere personal formado en la preparación de la materia prima, la carga del digestor, la seguridad del biogás y los principios microbiológicos básicos. El personal debe conocer los factores que afectan al rendimiento de metano -como la presencia de antibióticos en el estiércol animal, por ejemplo, la mezcla de sustratos, el pH, la temperatura y el tiempo de retención- y ser capaz de identificar y responder a los signos de desequilibrio del proceso. El funcionamiento de los equipos incluye el manejo de bombas, sistemas de biogás, válvulas de seguridad e instrumentos de seguridad y control. A mayor escala, el personal también debe gestionar la manipulación del digestato, el control de las emisiones y la documentación de conformidad. La formación es fundamental a todos los niveles para evitar fallos en el sistema, garantizar la seguridad y mantener la calidad del biogás. Es posible que los operadores municipales y los miembros de la comunidad necesiten apoyo para el desarrollo de capacidades a fin de garantizar la fiabilidad a largo plazo y el cumplimiento de la normativa. Fuentes: (46), (47), (51)

👜 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO

Genera puestos de trabajo, desde el mantenimiento a pequeña escala del sistema hasta el trabajo cualificado en el funcionamiento de la planta y la mejora del gas. Apoya el empleo formal en la gestión de residuos orgánicos al tiempo que promueve el acceso local a la energía y las prácticas de economía circular. Fuentes: (46), (51), (52)



BioCubierta

BARRERAS DE ENTRADA

● Alta

✓ CAPACIDADES NECESARIAS

La implementación y el mantenimiento de sistemas de biocubiertas a gran escala requiere conocimientos multidisciplinarios. El personal debe comprender el comportamiento de los gases del relleno sanitario, los procesos de oxidación del metano y la dinámica del compost. Para el diseño y la instalación adecuados del sistema, es esencial contar con conocimientos de topografía, medición del flujo de gases y selección de materiales. Los técnicos de campo deben controlar las concentraciones de gas, las emisiones a la superficie y la temperatura y humedad del compost. El éxito a largo plazo depende de la capacidad para interpretar los datos de control y ajustar las condiciones del sistema en consecuencia. También puede ser necesario disponer de capacidad de laboratorio para realizar pruebas de potencial de oxidación y análisis de emisiones a fin de apoyar la elaboración de informes reglamentarios y la verificación del rendimiento. Fuentes: (56), (57), (59)

👜 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO

Crea funciones especializadas en ingeniería, gestión de rellenos sanitarios y control de emisiones. Aunque requiere menos mano de obra, apoya el empleo cualificado en la mitigación del metano y crea capacidad local en servicios medioambientales. Fuentes: (56), (57), (59)



Alimentación animal

❗ DESAFÍOS

Importantes retos normativos y de seguridad. A menudo es ilegal alimentar a los animales con residuos alimentarios no tratados, especialmente con productos de origen animal, debido a riesgos como la fiebre aftosa o la encefalopatía espongiforme bovina. Aunque el tratamiento térmico (por ejemplo, hervir 30 minutos a 100°C) hace que los residuos sean microbiológicamente seguros, sigue preocupando el incumplimiento de la normativa. La Unión Europea fomenta el uso en la alimentación animal, pero aplica estrictas normas de bioseguridad que restringen mucho las aplicaciones. La separación y la frescura constantes de los residuos son cruciales para la seguridad. Fuentes: (33), (34), (35), (37)

🔑 OPORTUNIDADES

Reduce la dependencia de cultivos básicos como la soja y el maíz, disminuyendo el uso de la tierra, la demanda de agua y la deforestación. Los enfoques específicos para cada especie pueden optimizar la nutrición y la seguridad. El éxito depende de la inversión en sistemas de segregación y en asociaciones público-privadas para ampliar el procesamiento higiénico y regulado. Países como Japón y Corea del Sur reciclan de este modo más del 35% de los residuos alimentarios, aplicando una normativa estricta y un tratamiento térmico. Fuentes: (32), (34), (40), (42)



Compostaje

❗ DESAFÍOS

Uno de los principales obstáculos es el largo e incoherente proceso de autorización y zonificación. Las propiedades deben disponer de espacio y zonas de amortiguación adecuadas, lo que aumenta la complejidad. El mercado del compost está poco desarrollado: la demanda baja e inestable desalienta la inversión. La contaminación de los residuos post consumo por plásticos y vidrio aumenta los costes de procesamiento y reduce la calidad, por lo que la separación en origen es esencial para la calidad. La ausencia de especificaciones nacionales normalizadas para el compost en algunos países debilita aún más la confianza de los compradores. Se necesita una política coordinada, educación y gestión de la cadena de suministro. Fuentes: (32), (26)

🔑 OPORTUNIDADES

El compostaje ahorra espacio en los rellenos sanitarios y produce valiosas enmiendas del suelo que mejoran su salud, la retención de agua y el rendimiento de los cultivos. Las políticas emergentes -leyes estatales de adquisición de compost, incentivos- están ampliando los mercados y la viabilidad financiera, especialmente en zonas desatendidas. El compostaje favorece la agricultura regenerativa, la creación de empleo y la mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono. La promoción del compost en infraestructura, paisajismo y agricultura puede integrarlo en iniciativas de economía circular. El compostaje puede añadirse como un nuevo servicio de flujo de residuos a la recogida selectiva y el procesamiento de materiales que realizan las organizaciones de recicladores, aprovechando su trabajo. Fuentes: (32), (25)



Vermicompostaje

! DESAFÍOS

Los límites operativos y biológicos incluyen la sensibilidad de las lombrices a la humedad, la temperatura y el pH, lo que requiere entornos estables que pueden ser difíciles de mantener al aire libre o en climas variables. Los aportes de alta humedad deben gestionarse cuidadosamente para evitar el sobrecalentamiento o las condiciones anaeróbicas. El vermicompostaje no puede procesar directamente residuos cárnicos, lácteos o aceitosos, por lo que suele requerir etapas de pre compostaje que añaden costes. El rendimiento es lento, ya que las lombrices y los microbios estabilizan gradualmente los residuos en condiciones mesófilas, lo que requiere espacio, tiempo y una alimentación cuidadosa. Mantener la higiene es un reto debido a las bajas temperaturas del proceso. Un riesgo emergente son las especies invasoras de lombrices (por ejemplo, *Amyntas*), que pueden alterar los ecosistemas. El éxito depende de la formación de los operarios, las infraestructuras y la supervisión a largo plazo. Fuentes: (12), (13), (14), (18)

🔑 OPORTUNIDADES

Adecuado para la gestión descentralizada y local de residuos orgánicos, especialmente en zonas urbanas. Reduce las necesidades de transporte y produce enmiendas del suelo de alta calidad que mejoran la disponibilidad de nutrientes, la estructura del suelo y la microbiología, claves para unos sistemas alimentarios resistentes. Las propias lombrices son productos valiosos para la alimentación animal o la acuicultura. Los precios de mercado varían, con potencial en los canales premium. La ampliación requiere políticas de apoyo, materias primas garantizadas y desarrollo de la demanda. Fuente: (12)



Mosca soldado negra

! DESAFÍOS

La incertidumbre normativa está muy extendida, especialmente cuando el tratamiento de residuos de insectos se solapa con los sectores de la salud, la agricultura y el medio ambiente. Los conceptos erróneos sobre higiene, residuos y plagas provocan resistencia entre autoridades y comunidades. Es esencial un suministro de materia prima estable y no contaminada; la contaminación o las fluctuaciones de volumen reducen la productividad. El acceso al mercado de larvas, desechos o aceite se ve limitado por las nuevas normas y el escepticismo de los compradores. La competencia de tecnologías proteínicas alternativas (por ejemplo, la fermentación de precisión) puede presionar a la BSF para que se diferencie mejor. Fuentes: (3), (4), (5)

🔑 OPORTUNIDADES

Ofrece un tratamiento de residuos escalable, circular, bajo en carbono y adaptable a varios tamaños. Satisface la demanda de proteínas locales sostenibles, mejora orgánica del suelo y desvío de rellenos sanitarios, apoyando el cumplimiento de las prohibiciones de residuos orgánicos y los objetivos de emisiones. La ubicación conjunta del BSF con mercados o agroindustrias mejora la eficiencia. Existen oportunidades para la financiación del carbono, los empleos verdes y la mejora de la resistencia del sistema alimentario regional. Fuentes: (2), (3), (5)



Digestión anaeróbica

⚠ DESAFÍOS

La complejidad de la normativa y los permisos retrasa los proyectos, especialmente los de mediana y gran escala, debido al solapamiento de las normas sobre residuos, energía y agricultura.

La ubicación cerca de las fuentes de residuos está limitada por la disponibilidad de terrenos, los conflictos de zonificación y las preocupaciones de la comunidad por los olores, la seguridad y el tráfico. La variabilidad y contaminación de las materias primas (especialmente los residuos alimentarios postconsumo) perturban la digestión y aumentan los costes de preprocesamiento. La calidad irregular del digestato y la falta de claridad de las normas sobre fertilizantes dificultan el desarrollo del mercado. La viabilidad financiera depende de contratos de materias primas a largo plazo, del precio de la energía y de un apoyo político sostenido, que varían mucho de una región a otra. Fuentes: (46), (47), (49), (54)

🔑 OPORTUNIDADES

Reduce el uso de rellenos sanitarios al tiempo que genera energía renovable y digestato rico en nutrientes para sustituir a los fertilizantes químicos. Apoya los objetivos climáticos al capturar metano y desplazar a los combustibles fósiles. Políticas como los mandatos de desvío de residuos orgánicos y las tarifas de alimentación impulsan la viabilidad financiera y la inversión. El biogás promueve el empleo local, la resiliencia energética rural y la integración de la economía circular mediante la gestión de nutrientes y residuos en circuito cerrado. Fuentes: (46), (47), (49), (51)



BioCubierta

⚠ DESAFÍOS

La ampliación se enfrenta a barreras estructurales y operativas. La incertidumbre normativa se debe a que las biocubiertas se sitúan entre las jurisdicciones de gestión de residuos y de calidad del aire, lo que complica la concesión de permisos y la rendición de cuentas. La tecnología está infrautilizada debido a la escasa concienciación entre los operadores de rellenos sanitarios y los responsables de la toma de decisiones. El abastecimiento y transporte de grandes cantidades de compost maduro puede resultar caro cuando la oferta local es escasa. El compost se degrada a lo largo de 5-7 años, por lo que es necesario sustituirlo periódicamente; su rendimiento varía en función de la humedad, la compactación y el flujo de gases del relleno sanitario. La falta de protocolos de seguimiento normalizados y de mecanismos de financiación a largo plazo limita su adopción. Fuentes: (56), (57), (58), (59)

🔑 OPORTUNIDADES

Proporcionan una opción de mitigación del metano de bajo coste y bajo mantenimiento para los rellenos sanitarios heredados, lo que los hace especialmente adecuados para cumplir los objetivos climáticos globales. Su funcionamiento pasivo no sólo se adapta a zonas que carecen de infraestructuras activas de recogida de gases, sino que también puede servir como sustituto más eficaz y práctico. La ampliación de los objetivos de reducción de metano puede brindar oportunidades de financiación climática. Las biocubiertas promueven la reutilización del compost local, mejoran el cuidado posterior al cierre del relleno sanitario y apoyan la rehabilitación del emplazamiento. Con protocolos estandarizados y el reconocimiento de las políticas, las biocubiertas podrían convertirse en herramientas climáticas de uso generalizado en la gestión de residuos. Fuentes: (56), (57), (58), (59)

Casos de Éxito



Alimentación animal



Japón y Corea del Sur reciclan entre el

36% y el 43%

de los residuos alimentarios como alimento para animales en el marco de sistemas estrictamente regulados.



En Chile, la Fundación Realim aplica un modelo circular de conversión de residuos alimentarios en alimento animal que integra objetivos sociales y medioambientales a través de sistemas locales de recogida y entrega.

Fuentes: (34), (36)



Compostaje



En **Surabaya (Indonesia)**, la ciudad puso en marcha una estrategia descentralizada de compostaje mediante la distribución de 19.000 contenedores de compostaje a los hogares y la capacitación de líderes comunitarios y grupos de mujeres para promover la separación en origen. El programa consiguió desviar hasta 40 toneladas de residuos al día y sólo supuso entre el 1% y el 2% del presupuesto de gestión de residuos de la ciudad.



Hasiru Dala es una organización de **Bengaluru (India)** que apoya a más de 30 centros de recogida de residuos secos mediante proyectos descentralizados de compostaje que procesan los residuos orgánicos de las comunidades y los mercados. Su labor ha ayudado a más de 8.500 recicladores a obtener reconocimiento oficial y acceso a servicios sociales.



El sistema de compostaje de **San Francisco**, puesto en marcha en 1996 en toda la ciudad, utiliza un contenedor verde obligatorio para todos los restos de comida, recortes de jardín y papel sucio de hogares y empresas. Recology recoge diariamente más de 500 toneladas de residuos orgánicos y los transforma en compost para las granjas y viñedos locales. Este programa es una de las principales razones por las que la ciudad desvía más del 80% de sus residuos y evita unas 90.000 toneladas métricas de CO₂e al año, lo que equivale a retirar 20.000 coches de la circulación.

Fuentes: (31), (20)



Vermicompostaje



En **Costa Rica**, la empresa Lombrítica produce y vende vermicompost desde 2002. Suministra al sector agrícola enmiendas orgánicas estandarizadas y ha establecido una presencia minorista en el país. Este modelo muestra cómo las pequeñas y medianas empresas pueden crear mercados para el vermicompost a través de la coherencia del producto, la marca y la divulgación.

Fuentes: (11), (9), (15), (94)



En **Brasil**, el Proyecto R4 (Rancho Reduz, Recicla e Recomeça) en Rancho Queimado, Santa Catarina, lanzado en 2018, distribuyó compostadores domésticos a los residentes para promover el compostaje descentralizado y reducir los residuos de los rellenos sanitarios. Atendiendo a una población de 3.411 habitantes, el proyecto recicla 30 toneladas de residuos orgánicos al año - reduciendo la eliminación orgánica en rellenos sanitarios en un 25%- y alcanza una tasa de reciclaje de residuos secos del 40%. La iniciativa ha reducido las emisiones en 20 toneladas de CO₂eq y 0,64 toneladas de CH₄ al año, ha ahorrado 40 USD por tonelada compostada y ha provocado un descenso del 70% de los materiales reciclables enviados al relleno sanitario, con una inversión total de unos 99.000 USD entre 2018 y 2022.



Mosca soldado negra

9



En 2023, la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC) estudió una planta de Mosca Soldado Negro (BSF) para **Lima, Perú**, donde se generan más de 8.600 toneladas diarias de residuos municipales, más de la mitad orgánicos. La planta propuesta procesaría 250 toneladas/día, procedentes principalmente de los mercados de alimentos. El estudio concluyó que la BSF es técnica y legalmente viable en Lima, con potencial para reducir las emisiones de metano en más de un 50% frente a los métodos tradicionales. Los factores clave para el éxito son la proximidad a los mercados, la estabilidad de las tasas de vertido y la solidez de los mercados posteriores. La viabilidad económica es probable por encima de las 100 toneladas/día. El Ministerio de Medio Ambiente reconoció el BSF como una tecnología prioritaria de la economía circular, especialmente para las regiones amazónicas con insumos orgánicos y necesidades de la acuicultura.

10



A pequeña escala, **la ONG Living Soils de Grand Bassam (Costa de Marfil)** creó un exitoso modelo descentralizado de baja tecnología "outgrowers" en el que la fase de cría se gestiona en la granja Abel, mientras que los neonatos se distribuyen a 5 localidades donde se generan residuos. Los mercados locales recogen sus residuos orgánicos para enviarlos a los lugares de engorde. La granja empezó a funcionar en enero de 2025 y en la actualidad desvía mensualmente 30 toneladas de residuos orgánicos de los rellenos sanitarios (63 toneladas de CO₂-eq evitadas), produce 3 toneladas de larvas y da empleo directo a 8 trabajadores.

11



En **Neglasari, Bandung (Indonesia)**, el sistema de gestión de residuos es un esfuerzo de colaboración: **YPBB** estableció el sistema de recogida selectiva, mientras que la infraestructura para la Mosca soldado negra y el compostaje fue desarrollada por las autoridades municipales. Aunque la reducción global de residuos sigue siendo limitada debido a los problemas de cumplimiento de la separación en origen, el proyecto ha conseguido procesar diariamente entre 500 y 700 kg de residuos orgánicos, entre el 40% y el 60% del potencial estimado de 1.200 kg de residuos orgánicos de la zona. El firme liderazgo del jefe de la aldea ha sido crucial, sobre todo en la elaboración de presupuestos, la provisión de mano de obra y la exigencia a los administradores locales de que practiquen el compostaje doméstico, dando ejemplo a los residentes.

Fuente: (3)



Digestión anaeróbica

12



El Ecoparque Caju de Río de Janeiro (**Brasil**) está poniendo a prueba un modelo de economía circular para la gestión de residuos orgánicos. En 2024, su "Unidad de Biometanización" procesó 4.300 toneladas de residuos orgánicos procedentes de escuelas, restaurantes, supermercados y poda de árboles, convirtiéndolos en electricidad renovable y biogás, que alimenta las operaciones del Ecoparque y los vehículos eléctricos de su Banco de Alimentos. El Banco de Alimentos, puesto en marcha en 2024, ayuda a más de 700 residentes vulnerables del barrio de Caju, con más de 16 toneladas de alimentos donados por supermercados locales. Además, el Ecoparque produjo más de 540 toneladas de abono orgánico ("Fertilurb") en 2024, utilizado en programas de agricultura urbana y reforestación en todo Río de Janeiro.

Fuente: (55)



BioCubierta

13



En 2009 se implantó un sistema de biocubierta a gran escala en el relleno sanitario de Klintholm (**Dinamarca**), en una superficie de 4.800 m², utilizando compost de origen local y hormigón triturado. Diseñada para mitigar las emisiones de metano de una celda cerrada sin infraestructura de recuperación de gases, la biocubierta alcanzó una eficiencia media de oxidación del metano del 80%. Seis años después, a pesar de no haber recibido mantenimiento, las mediciones sobre el terreno confirmaron un rendimiento sostenido, incluso durante el invierno. Las elevadas temperaturas del compost (13-27 °C) y los índices constantes de oxidación de gases demostraron la resistencia del sistema y su funcionalidad a largo plazo en climas templados.

Fuente: (59)



Conclusiones y Recomendaciones

Los responsables políticos desempeñan un papel fundamental a la hora de transformar los residuos orgánicos de un problema a un valioso recurso comunitario. Los siguientes puntos clave ponen de relieve estrategias probadas y conocimientos prácticos que pueden ayudar a las ciudades a diseñar sistemas de gestión de residuos orgánicos eficaces e inclusivos, generando beneficios ambientales, sociales y económicos para sus comunidades.

1 Los residuos orgánicos son un recurso rico en nutrientes y energía que, cuando se gestiona adecuadamente, puede apoyar la agricultura local, la generación de energía, la creación de empleo y la mitigación del metano.

El verdadero valor de las estrategias de gestión de residuos orgánicos reside en sus beneficios a largo plazo: protección del medio ambiente, mejora de la salud pública y ahorro duradero para las comunidades. Aunque los costes del ciclo de vida pueden superar el valor de mercado directo de los productos, estos sistemas reducen el uso de rellenos sanitarios, reducen las emisiones de metano y cierran los ciclos de nutrientes. Al tratar los residuos orgánicos como un activo valioso y diseñar sistemas que maximicen estos beneficios más amplios, los municipios pueden construir comunidades más sanas y resistentes.

2 La jerarquía de gestión de residuos debe guiar la acción.

La prevención es lo primero –a menudo a través de políticas que van más allá del sector de los residuos–, seguida de la reorientación de los residuos orgánicos a mercados secundarios o a la alimentación animal cuando a sea factible, y, en caso contrario, devolverlos a los suelos mediante el compostaje o utilizarlos para producir energía a través de la digestión anaeróbica. Debe evitarse el vertido de residuos orgánicos, debido a las elevadas emisiones de metano y a la pérdida de nutrientes. Unas directrices sólidas y unos inspectores formados son fundamentales para reducir la incertidumbre normativa y permitir la donación y recuperación seguras de residuos alimentarios para el consumo humano y animal.

3 La gestión eficaz de los residuos orgánicos comienza con una separación en origen sólida, respaldada por sistemas de recogida regulares e intuitivos y por la participación activa de la comunidad

Cuando los residentes, los grupos locales y los recicladores participan en la separación de los residuos orgánicos en origen, los municipios pueden aprovechar una amplia gama de tecnologías escalables –como el procesamiento de la mosca soldado negra, el vermicompostaje, el compostaje, la digestión anaeróbica y las biocubiertas de relleno sanitario– adaptadas a sus necesidades específicas. Integrando la participación pública con las soluciones técnicas adecuadas, las comunidades pueden transformar los residuos orgánicos de un desafío a un recurso valioso, construyendo sistemas de gestión más eficientes, inclusivos y sostenibles.

4 Aunque las soluciones para la gestión de residuos orgánicos están bien establecidas, la verdadera oportunidad reside en optimizar la logística.

Tratando los residuos alimentarios lo más cerca posible de la fuente, los municipios pueden reducir los costes de transporte y minimizar la contaminación por envases y plásticos. El diseño de sistemas que aprovechen las eficiencias espaciales y materiales -como la recogida y el tratamiento descentralizados- permite a las comunidades convertir los retos logísticos en ventajas, creando flujos de residuos más limpios y rentables que son más fáciles de procesar y reciclar.

5 La selección de la estrategia debe basarse en el contexto.

Si una opción descentralizada reduce los costes de transporte y es más rentable desde el punto de vista económico -sin generar mayores perjuicios medioambientales o sociales-, hay que darle prioridad.

Factores como el espacio disponible, el volumen de residuos, la dispersión geográfica, la capacidad normativa y el potencial de mitigación del metano deben orientar las decisiones. Por ejemplo, procesar los residuos orgánicos a 30 km de su punto de generación puede resultar ineficaz; en tales casos, los sistemas de compostaje a menor escala o los BSF situados cerca de la fuente pueden dar mejores resultados.

6 Una gran ventaja de las tecnologías actuales de gestión de residuos orgánicos es su flexibilidad y su potencial integrador para crear puestos de trabajo con escasas barreras de entrada.

Las opciones descentralizadas, como el procesamiento de la mosca soldado negra, el compostaje y el vermicompostaje, son accesibles a pequeñas empresas, cooperativas y particulares -incluidos los recicladores-, lo que permite su inclusión y formalización en el sector. Estos sistemas no sólo generan empleo, sino que también capacitan a los grupos comunitarios y a la mano de obra informal para participar en las nuevas cadenas de valor y beneficiarse de ellas.



Bibliografía

Mosca soldado negra

1. Amrul, N. F., Ahmad, I. K., Ahmad Basri, N. E., Suja, F., Abdul Jalil, N. A., & Azman, N. A. (2022). Una revisión del tratamiento de residuos orgánicos utilizando la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*). *Sustainability*, 14(8), 4565. <https://doi.org/10.3390/su14084565>
2. Bruno, D., Orlando, M., Testa, E., Carnevale Miino, M., Pesaro, G., Miceli, M., ... & Tettamanti, G. (2025). Valorización de residuos orgánicos a través de la mosca soldado negra: Hacia un verdadero proceso de bioeconomía circular. *Waste Management*, 191, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.030>
3. Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC). (2024). Estudio de caso: Vinculando la gestión de residuos y la producción de proteínas a través de la tecnología de insectos. <https://www.ccacoalition.org/news/ccac-case-study-linking-waste-management-and-protein-production-through-insect-technology>
4. Diener, S. (2010). Valorización de residuos sólidos orgánicos mediante la mosca soldado negra, *Hermetia illucens*, en países de ingresos bajos y medios [Tesis doctoral, ETH Zurich]. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/152792>
5. Tepper, K., Edwards, O., Sunna, A., Paulsen, I. T., & Maselko, M. (2024). Desviando residuos orgánicos de los vertederos mediante la bio fabricación de insectos utilizando moscas soldado negras modificadas genéticamente (*Hermetia illucens*). *Communications Biology*, 7, 862. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06516-8>
6. Folleto sobre la tecnología de la mosca soldado negra. (2024). Infografía de la BSF: Utilizar la naturaleza para valorizar los residuos orgánicos y crear una economía circular de mitigación de emisiones. Publicación interna (sin autor formal). Sanchez Matos, J., de Araújo, L. P., Allaman, I. B., Lôbo, I. P., de Oliva, S. T., Tavares, T. M., & de Almeida Neto, J. A. (2021).
7. Evaluación de la reducción de la emisión de metano en estiércol porcino y bovino tratado con larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens* L.). *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, Artículo 460. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09252-2>

Vermicompostaje

8. Somarriba Reyes, R. J., & Guzmán Guillén, F. (2004). Guía de Lombricultura. Universidad Nacional Agraria, Dirección de Investigación, Extensión y Posgrado (DIEP). Serie Técnica No. 4.
9. Cambronero, N. (2008). Crece la demanda de fertilizantes orgánicos. *La República*. <https://www.larepublica.net/noticia/crece-demanda-de-fertilizantes-organicos>
10. Duc asse, V., Capowiez, Y., & Peigné, J. (2022). Efecto sobre las comunidades de lombrices de tierra de diferentes fracciones orgánicas de los tratamientos de residuos sólidos urbanos aplicados en campo [Poster]. INRAE & Institut Supérieur d'Agriculture Rhône-Alpes. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16858.93123>
11. Deshpande, A. (2011). Proyecto de gestión de residuos sólidos urbanos (compostaje y vermicompostaje). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8357044>
12. Ducasse, V., Capowiez, Y., & Peigné, J. (2022). El vermicompostaje de residuos sólidos urbanos como posible palanca para el desarrollo de una agricultura sostenible: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5), 1-40. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00819-y>
13. Churchill, S. (2020). Guía completa del vermicompostaje de flujo continuo. Urban Worm Company. <https://urbanwormcompany.com/complete-guide-to-continuous-flow-vermicomposting/>
14. Solanki, S., & Mahore, G. (2021). Unidad de vermicompostaje de bajo coste a gran escala. *Journal of Physics: Conference Series*, 2115(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2115/1/012026>
15. Maddock, N. (s.f.). NutriSoil Case Study: Col Harper - Empoderar a los agricultores, enriquecer los alimentos. NutriSoil. <https://nutrisoil.com.au>
16. Rodríguez Pérez, L. A., Borroto Pérez, M., Vega Guillén, O., Morales Rojas, M., & Gutiérrez Rojas, I. (2019). Programa de lombricultura para el manejo de residuos comunitarios. *M+A Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 20(1), 120-141.

17. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Asuntos Rurales de Ontario. (2010). Vermicasting (o vermicompostaje). <https://www.ontario.ca/page/vermicasting-or-vermicomposting>.
18. Granja de lombrices del tío Jim. (2020). Vermicompostaje para principiantes. <https://unclejimswormfarm.com/vermicomposting-for-beginners/>
19. Elizondo Coto, F. (2004). La lombricultura como modelo alternativo para el manejo de desechos sólidos orgánicos de una comunidad urbana en San Sebastián, San José [Reporte final, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

Compostaje

20. Compostaje 101. (2020). Natural Resources Defense Council (NRDC). <https://www.nrdc.org/stories/composting-101>
21. Saypariya, D. C., & al. (2024). Compostaje de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos en un compostador biodegradable de tres etapas. Heliyon, 10, e37444. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37444>
22. Departamento de Medio Ambiente, Turismo, Ciencia e Innovación (DETSI), Queensland. (2023). Cómo compostar eficazmente: Guía paso a paso.
23. Tamás, A., et al. (2019). STEPS en fracción orgánica de residuos sólidos urbanos - Evaluación de compostaje y calidad del compost. Documentos científicos. Serie A. Agronomía, LXII(2), 144-146.
24. Proyecto H2020. (s.f.). Valorizar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos mediante una biorrefinería integrada a nivel comercial.
25. Compost Connect. (2024). ¿Qué es el compostaje industrial? <https://www.compostconnect.org/what-is-industrial-composting>.
26. Sardarmehni, M., Levis, J. W., & Barlaz, M. A. (2021). ¿Cuál es el mejor uso final para el compost derivado de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos? Environmental Science & Technology, 55(1), 73-81. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04997>
27. Johannes, A. (2024). Compost blog: La guía definitiva para hacer compost en una secadora.
28. Caminati, V., et al. (2022). Recogida y compostaje de residuos orgánicos: Un estudio de caso en la ciudad de Beira, Mozambique. International Journal of Environmental Impacts, 5(3), 259-270. <https://doi.org/10.2495/EI-V5-N3-259-270>
29. Lekkas, D. F., et al. (2022). Compostaje de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como alternativa a la disposición incontrolada: El caso del municipio de Kalamata (Grecia). Global NEST Journal, 24(1), 119-128. <https://doi.org/10.30955/gnj.003486>
30. Zoungrana, A., et al. (2014). Compostaje de residuos sólidos urbanos: Case study of Istanbul. Simposio sobre gestión de residuos de EurAsia.
31. IGES & UNEP IETC. (2020). Serie de directrices CCET sobre tecnologías intermedias de tratamiento de residuos sólidos urbanos: Compostaje.
32. Coalición Zero Food Waste. (2023). Alcanzar el Desperdicio Cero de Alimentos: A State Policy Toolkit. Disponible en: <https://chlp.org/news-and-events/news-and-commentary/news/zero-food-waste-coalition-highlights-state-policy-opportunities-to-reduce-food-waste/>

Alimentación animal

33. Nath, P. C., Ojha, A., Debnath, S., Sharma, M., Nayak, P. K., Sridhar, K. y Inbaraj, B. S. (2023). Valorización de residuos alimentarios como alimento para animales: Un paso hacia la gestión sostenible de residuos alimentarios y la bioeconomía circular. Animals, 13(8), 1366. <https://doi.org/10.3390/ani13081366>
34. Clínica de Derecho y Política Alimentaria de la Facultad de Derecho de Harvard. (2016). Sobras para el ganado: Una guía legal para utilizar el exceso de comida como alimento animal. https://chlp.org/wp-content/uploads/2013/12/Leftovers-for-Livestock_A-Legal-Guide_August-2016.pdf
35. Servicios veterinarios del USDA APHIS. (s.f.). Realización de la inspección de la Ley de protección de la salud porcina (alimentación con basura). Departamento de Agricultura de EE.UU.
36. Agencia de Normas Alimentarias. (s.f.). El futuro de la alimentación animal: Alimentos antiguos, residuos alimentarios, subproductos industriales y corrientes de residuos. <https://www.food.gov.uk/research/the-future-of-animal-feed-former-foods-food-waste-and-industry-by-products-and-waste-streams>
37. Kawashima, T. (2021). El uso de residuos alimentarios como fuente de proteínas para la alimentación animal: Estado actual y desarrollo tecnológico en Japón. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/4/y5019e/y5019e0i.htm>

38. One5C. (2024). Transformando los residuos alimentarios en alimento para animales. <https://one5c.com/food-waste-animal-feed-136942045/>
39. Rivin, J., Miller, Z., & Matel, O. (2013). Using food waste as livestock feed (A4069-02). University of Wisconsin-Extension. <https://outagamie.extension.wisc.edu/files/2012/10/Using-Food-Waste-as-Livestock-Feed.pdf>
40. USDA APHIS. (2024). Desperdicio de alimentos humanos y cerdos: Cómo proteger la salud de la industria porcina estadounidense. Departamento de Agricultura de EE.UU.
41. Agencia de Protección Medioambiental de EE.UU.. (s.f.). Excess food opportunities map. <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/excess-food-opportunities-map>
42. USDA APHIS - Puerto Rico. (s.f.). Alimentación tradicional de desecho. Departamento de Agricultura de EE.UU. - APHIS.
43. Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.. (2009). Alimentar animales: La solución empresarial a los restos de comida. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P1005N3W.txt>
44. USDA APHIS - Oficina de Puerto Rico. (s.f.). Requisitos para cocinar. Departamento de Agricultura de EE.UU.
45. Van der Poel, A. F. B., Abdollahi, M. R., Cheng, H., Colovic, R., den Hartog, L. A., Miladinovic, D., Page, G., Sijssens, K., Smillie, J. F., Thomas, M., Wang, W., Yu, P., & Hendriks, W. H. (2020). Orientaciones futuras de la investigación en tecnología de alimentación animal para afrontar los retos de un mundo en constante evolución. Ciencia y tecnología de la alimentación animal. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114692>

Digestión anaeróbica

46. Banks, C. J., Heaven, S., Zhang, Y., & Baier, U. (2018). Digestión de residuos de alimentos: Digestión anaeróbica de residuos de alimentos para una economía circular. IEA Bioenergy Task 37. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/12/IEABioenergy_Task-37_Food-Waste_2Psummary-Rev-2.pdf
47. Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2019). Producción de biogás a partir de residuos de alimentos: Una revisión sobre desarrollos recientes y perspectivas futuras. Bioresource Technology Reports, 7, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>
48. Paritosh, K., Yadav, M., Mathur, S., Balan, V., Liao, W., Pareek, N., & Vivekanand, V. (2018). Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos: Visión general de las metodologías de tratamiento para mejorar la biodegradabilidad anaeróbica. Frontiers in Energy Research, 6, 75. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00075>
49. Al-Wahaibi, A., Osman, A. I., Al-Muhtaseb, A. H., Alqaisi, O., Baawain, M., Fawzy, S., & Rooney, D. W. (2020). Evaluación tecnoeconómica de la producción de biogás a partir de residuos alimentarios mediante digestión anaeróbica. Scientific Reports, 10, 15719. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72897-5>
50. Mohamed Ali, A., Alam, M. Z., Mohamed Abdoul-Latif, F., Jami, M. S., Gamiye Bouh, I., Bello, I. A., & Ainane, T. (2023). Producción de biogás a partir de residuos alimentarios mediante el proceso de digestión anaeróbica con pretratamiento basado en biopelículas. Processes, 11(3), 655. <https://doi.org/10.3390/pr11030655>
51. Instituto de Estudios Medioambientales y Energéticos (EESI). (2017). Biogas: Converting Waste to Energy. <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy>
52. MEIKO GREEN Waste Solutions. (s.f.). Convertir los residuos de alimentos en abono y energía: Plantas de biogás a pequeña escala para el sector alimentario. Obtenido de <https://www.meiko.com/en/meiko-experience/magazine/small-scale-biogas-plants-for-the-food-service-sector>
53. HomeBiogas. (2024). Cómo crear biogás a partir de residuos alimentarios. <https://www.homebiogas.com/blog/biogas-from-food-waste/>
54. Bioenergy Insight. (2016). Ecomaine pone en marcha un programa de valorización de residuos alimentarios con producción de biogás. <https://www.bioenergy-news.com/news/ecomaine-launches-food-waste-recovery-programme-with-biogas-production/>

BioCubierta

55. Centro y Red de Tecnología del Clima. (2016). Biocoberturas de rellenos sanitarios. Obtenido de <https://www.ctc-n.org/technologies/biocovers-landfills>
56. Kjeldsen, P., Kissas, K., & Scheutz, C. (2024). ¿Los sistemas de biocubiertas de rellenos sanitarios a base de compost diseñados para la oxidación del metano emiten óxido nitroso en cantidades significativas? Waste Management, 190, 506-510. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.009>

57. Scheutz, C., Duan, Z., Møller, J., & Kjeldsen, P. (2023). Evaluación ambiental de la mitigación de gases de vertedero mediante biocobertura y recolección de gases con utilización de energía en vertederos antiguos. *Waste Management*, 165, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.014>
58. Centro de Derecho, Energía y Medio Ambiente, Universidad de California, Berkeley. (2022). Lucha contra el cambio climático mediante biocubiertas en vertederos. Obtenido de <https://cdss.berkeley.edu/project/fighting-climate-change-through-landfill-biocovers>
59. Scheutz, C., Olesen, A. O. U., Fredenslund, A. M., & Kjeldsen, P. (2022). Revisiting the passive biocover system at Klintholm landfill, six years after construction. *Waste Management*, 145, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.034>
60. Fundación Changing Markets, Agencia de Investigación Ambiental y Alianza Global para Alternativas a la Incineración. (2022). El metano importa: Un enfoque integral para la mitigación del metano. Obtenido de <https://changingmarkets.org/report/methane-matters-a-comprehensive-approach-to-methane-mitigation/>

Recursos Adicionales

61. De Residuos Cero a Emisiones Cero. GAIA. (2002). https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2022/11/zero-waste-to-zero-emissions_full-report.pdf
62. Nair, Shibu. GAIA. (2022). De vuelta a la Tierra: Compostaje para diversos contextos. https://www.no-burn.org/resources/back-to-earth/?fbclid=IwAR15pdcxbyfWxA0w1J-uULaZ0D_gP7KT_LexR0sXW07xt2hB2xM6Nv7ZTe8
63. ILSR. (2019) Compostaje comunitario bien hecho: Guía de las mejores prácticas de gestión. . <https://ilsr.org/composting-bmp-guide/>
64. Hasiru Dala. (2019). Investigación y publicaciones. <https://hasirudala.in/10-years-of-hasiru-dala/research-and-publications/>
65. Hasiru Dala. (2020). Zero Waste Ward 177 Report. <https://hasirudala.in/resources/documents/>
66. Cambridge University Press. (s.f.). Innovaciones Hasiru Dala: Mejorando las vidas de los recolectores de residuos. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/36AF21C6809CB5FEDC264616BF64A0FD>
67. Acabar con los residuos plásticos. (s.f.). Integración de los recicladores en los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos. En <https://www.endplasticwaste.org/insights/story/how-to-integrate-waste-pickers-into-a-city-solid-waste-management-system>
68. Misión Sostenibilidad. (2024). Transformando vidas y gestión de residuos en Bengaluru: el viaje de Hasiru Dala Innovations. En <https://missionsustainability.org/blog/waste-management-in-bengaluru-hasiru-dala-innovations/>
69. Innovaciones Hasiru Dala. (2023). Empresa de gestión de residuos en Bangalore | Inclusive Circulariry. <https://hasirudalainnovations.com>
70. Malur, R., Kumuda, C. S., & Kumar, A. (2023, 11 de octubre). Historias de valores y principios de justicia ambiental para la acción climática: Hasiru Dala – India. Alianza Global para Alternativas a la Incineración (GAIA). <https://www.no-burn.org/blog-environmental-justice-hasiru-dala-india/>
71. Experiencias de ocio Tamara. (2024). Empoderando a los ambientalistas silenciosos: Cómo los recicladores están transformando la sostenibilidad. <https://tamaraeisureexperiences.com/empowering-the-silent-environmentalists-how-waste-pickers-are-transforming-sustainability/>
72. Tejas@IIMB. (s.f.). Hasiru Dala: Empoderando a los recicladores (Case Study Report Part A). [https://tejas.iimb.ac.in/articles/Hasiru%20Dala%20Case%20Study%20Report%20\(Part%20A\).pdf](https://tejas.iimb.ac.in/articles/Hasiru%20Dala%20Case%20Study%20Report%20(Part%20A).pdf)
73. Ciudad y Condado de San Francisco. (2012). San Francisco alcanza el 80% de desvío de rellenos sanitarios. <https://sfmayor.org/article/mayor-lee-announces-san-francisco-reaches-80-percent-landfill-waste-diversion-leads-all>
74. Recology. (s.f.). Programa de compostaje de San Francisco. <https://www.recology.com/recology-san-francisco/compost/>
75. Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU. (2025). Zero waste case study: San Francisco. <https://www.epa.gov/transforming-waste-tool/case-study-san-francisco>

76. Gunders, D. (2012). San Francisco lidera el compostaje. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/food-matters-san-francisco-composting-cs.pdf>
77. CCAC (2025) Mercado de ideas. https://www.canva.com/design/DAGfpK8z-ds/iV0Br2SW1lwrzq4tmejA1w/view?utm_content=DAGfpK8z-ds&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=uniquelinks&utlId=h2c4216a9d4#1
78. FHI 360. (2024). Las moscas soldado negras y los "barriles mágicos" reducen los residuos urbanos. Obtenido de <https://www.fhi360.org/articles/black-soldier-flies-and-magic-barrels-reduce-community-waste>
79. Jones, P. (2023). Análisis de costo-beneficio del Proyecto Piloto de Compostaje de Mercado Matutino en el Jardín Botánico de Durban: Informe Final. Proyecto Cero Residuos de Warwick. <https://africazerowastehub.org.za/wp-content/uploads/2023/11/MunicipalSavingsCompostingCBA.pdf>
80. Zero Waste Europe. (2016). Recogida selectiva: El camino hacia el compostaje. Amigos de la Tierra España. <https://zerowasteurope.eu/downloads/separate-collection-the-path-to-composting/>
81. Vieira, V. H. A. de M., & Ferreira dos Santos, L. (2023). Novos modelos de compostagem nas cidades: Integrando reciclagem, agricultura e moradia [PDF]. Instituto Pólis. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2024/03/esp-Compostagem-nas-cidades-WEB.pdf>
82. GAIA Alianza Global por Alternativas a la Incineración. (2019). Compostaje comunitario: Experiencias de todo el mundo [Webinar]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=_BP3WyZKnKU
83. Allen, C., y Alianza Global para Alternativas a la Incineración. (2023). Residuos vegetales a residuo cero en La Pintana, Chile. Otros Mundos. <https://www.no-burn.org/vegetable-waste-to-zero-waste-in-la-pintana-chile/>
84. Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H., & Favoino, E. (2009). Compostaje y utilización del compost: Contabilidad de los gases de efecto invernadero y las contribuciones al calentamiento global. *Waste Management & Research*, 27(8), 800-812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>
85. Coalición Clima y Aire Limpio. (2024). Estudio de caso de la CCAC: Vinculando la gestión de residuos y la producción de proteínas a través de la tecnología de insectos. <https://www.ccacoalition.org/news/ccac-case-study-linking-waste-management-and-protein-production-through-insect-technology>
86. Ribeiro-Broomhead, J. & Tangri, N. (2021). Basura cero y recuperación económica: el potencial de creación de empleo de las soluciones de cero residuos. Alianza Global para Alternativas a la Incineración. www.doi.org/10.46556/GFW6885
87. Coalición Zero Food Waste. (2023) Achieving zero food waste: a state policy toolkit, <https://cdn.sanity.io/files/34qvyoil/production/a517a31a81c38d76e897dd539bde3207affa164d.pdf>
88. Coalición Clima y Aire Limpio. (2024). Transformar los residuos, sostener el futuro: Nueva guía sobre sistemas de mosca soldado negra. <https://www.ccacoalition.org/news/transforming-waste-sustaining-future-new-guide-black-soldier-fly-systems>
89. Alimento y aditivos. (2023). Aceite de mosca soldado negra: A promising functional ingredient. <https://www.feedandadditive.com/black-soldier-fly-oil-a-promising-functional-ingredient/>
90. Witono, J. R., Setyadi, F. F., Deandra, P. P. y Wanta, K. C. (2024). Análisis exhaustivo de la extracción de quitina de la mosca soldado negra para la producción de quitosano. *Chemical Engineering Transactions*, 108, Artículo 23714. <https://pp.omikk.bme.hu/ch/article/view/23714>
91. Zhou, Y., Zhang, Y., & Wang, H. (2023). Evaluación ambiental de la mitigación de gases de vertedero mediante biocobertura y recolección de gases. *Waste Management*, 169, 1-10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X2300291X>
92. Chavan, D., & Kumar, S. (2018). Reducción de la emisión de metano del relleno sanitario utilizando biocover como sistema de biomitigación: Una revisión. https://www.researchgate.net/publication/326684740_Reduction_of_methane_emission_from_landfill_using_biocover_as_a_biomitigation_system_A_review
93. FAO. (2013). Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf>
94. Brasil composta cultivada. (s.f.). Fortaleciendo a gestão de resíduos orgânicos. Obtenido el 16 de junio de 2025, de <https://brasilcompostacultiva.org.br/>
95. Scharff, H., Soon, H.-Y., Taremwa, S. R., Zegers, D., Dick, B., Villas Bôas Zanon, T., & Shamrock, J. (2023). El impacto de la gestión de vertederos en las emisiones de metano. *Gestión de Residuos e Investigación*, 1-13. <https://doi.org/10.1177/0734242X231200742>

Agradecimientos

GAIA agradece a todas las comunidades que aparecen en la publicación que hayan accedido a ser entrevistadas y presentadas, y que hayan compartido sus fotos para su uso en la publicación.

Esta publicación forma parte del proyecto general financiado por la Coalición por el Clima y el Aire Limpio (CCAC), titulado "*Mejorar la escala de los proyectos comunitarios de gestión de residuos mediante el desarrollo conjunto de proyectos con el sector informal*". La reproducción para la venta o con fines comerciales está prohibida sin el permiso escrito del titular de los derechos de autor.

Foto de portada: Macarena G. Mavroski.

El Equipo Editorial

Authors

Macarena G. Mavroski
Joaquín Viquez

Editor

Sonia Astudillo

Technical Reviewers

Yobel Putra
Mariel Vilella
Cecilia Allen
Mariela Pino
Donovan Storey
Piotr Barczak

Designer

Annika N. Hernandez

About GAIA

GAIA es una red de grupos de base y alianzas nacionales y regionales que representan a más de 1000 organizaciones de 100 países. Con nuestro trabajo pretendemos catalizar un cambio global hacia la justicia medioambiental fortaleciendo los movimientos sociales de base que promueven soluciones a los residuos y la contaminación. Imaginamos un mundo justo, de Basura Cero, construido sobre el respeto a los límites ecológicos y los derechos comunitarios, donde las personas estén libres de la carga de la contaminación tóxica y los recursos se conserven de forma sostenible, no se quemen ni se viertan. www.no-burn.org

Supported by



Serie de orientaciones técnicas de GAIA para responsables políticos y financieros sobre medidas rápidas en materia de residuos y metano:

Residuos orgánicos Municipales

Estrategias para reducir las emisiones de metano

© September 2025 Alianza Global para Alternativas a la Incineración
1958 University Avenue, Berkeley, CA, EE.UU.