

18. Flujo de residuos sólidos urbanos en México: ¿Un camino hacia la economía circular?



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.18>

GEHOVANA GONZÁLEZ-BLANCO¹

SERGIO ALCARAZ-IBARRA²

IVÁN CERVANTES-ZEPEDA³

IVÁN GALLEGO-ALARCÓN⁴

MARÍA CLARA ROSAS-GUTIÉRREZ⁵

LAURA WHITE-OLASCOAGA⁶

DAVID GARCÍA-MONDRAGÓN⁷

Resumen

En México, los diagnósticos básicos para la gestión integrada de los residuos (DBGIR) son el punto de partida en la ejecución de planes y programas de manejo de residuos; son instrumentos que el gobierno federal genera como indicadores de la eficiencia de sus políticas públicas. Un análisis de la línea de tiempo y las políticas implementadas en los DBGIR muestra como ha sido el trayecto en la gestión de los residuos sólidos urbanos y evidencia elementos fundamentales de la economía circular, como recolección, acopio, almacenamiento, transporte, tratamiento, disposición final y valorización. El objetivo de este trabajo es presentar un marco para evaluar los impactos de

¹ Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3818-3458>

² Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2270-5741>

³ Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor-investigador en el Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua de la UAEMex, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2859-1223>

⁴ Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9125-6532>

⁵ Maestrante en Ciencias del Agua en el Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua de la UAEMex, México. ORCID <https://orcid.org/0009-0008-3806-5367>

⁶ Doctora en Ciencias Ambientales. Profesora-investigadora de la UAEMex, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9189-3902>

⁷ Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1721-5465>

la circularidad en la recuperación de recursos a partir de los flujos de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), basándose en el diseño de escenarios de sistemas de tratamiento implementados en México. La FORSU ha sido considerada e incorporada parcialmente a la economía circular, desde el año 2006, a través de la pepena, valorización parcial y disposición final, principalmente. Sin embargo, su gestión se ha visto rezagada en los mismos aspectos, lo cual sigue generando serios problemas ambientales y no se cuenta con estadísticas del volumen real tratado. Los principales tratamientos son compostaje, digestión anaerobia y pirólisis. Sin embargo, no se tiene un número exacto sobre el número de sistemas operando en el país. Además de que la mayoría de los residuos que se tratan son de manejo especial y no urbanos.

Palabras Clave: *flujo de residuos; gestión integral de residuos; residuos orgánicos; residuos sólidos urbanos; valorización de residuos orgánicos.*

Introducción

La generación de residuos sólidos es inherente a la vida de las personas: en las casas, las dependencias públicas y privadas, la recreación, producción, arte, entre otras. En América Latina y el Caribe el manejo de estos residuos es responsabilidad de los gobiernos en sus diversos niveles; sin embargo, por las características, complejidad y volumen de generación, el manejo y gestión se ven superados. En este sentido, los instrumentos de legislación son una herramienta fundamental para controlar y evitar la contaminación del medio biótico (seres vivos) y abiótico (agua, suelo y aire) dentro de los sistemas naturales en una región geográfica o política (Tello-Espinoza, 2018).

La gestión de los residuos en la legislación mexicana

En México, la Constitución Política establece en los artículos 4 y 25 el derecho de toda persona a un medio ambiente sano y que la responsabili-

dad para garantizarlo corresponde al Estado. Derivado de estos artículos, en 1988 se promulgó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), donde se establecen las disposiciones para la protección del ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sin embargo, es en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) publicada en 2003, donde se definen las políticas públicas en materia de prevención, valorización y gestión integral de los residuos (Cervantes-Zepeda, 2022).

En el título cuarto de la LGPGIR, referido a los instrumentos de la política de prevención y gestión integral de los residuos, capítulo I (Programas para la prevención y gestión integral de los residuos), el artículo 25° establece que la Secretaría deberá formular e instrumentar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, de conformidad con esta Ley, mediante el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos (DBGIR) y demás disposiciones aplicables; cuyo estudio debe considerar la cantidad y composición de los residuos, así como la infraestructura para manejarlos integralmente (DOF, 2003).

Es así como los DBGIR son el punto de partida en la ejecución de planes y programas de manejo de residuos; instrumentos que el gobierno federal mexicano genera como indicadores de la eficiencia de sus políticas públicas. Por otra parte, en el año 2022 la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, se dio a la tarea de compilar el Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (ANRSU), cuyo propósito es reunir en una sola fuente de consulta la información precisa, confiable y actualizada sobre la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en las diferentes entidades del país, que permita a las autoridades ambientales, conocer, estudiar la problemática y tomar las decisiones pertinentes para mitigarla (INECC, 2022).

Clasificación para la gestión de los residuos

El objetivo de la LGPGIR, desde su publicación a inicios del siglo XXI, fue “garantizar un medio ambiente adecuado y un desarrollo sustentable a tra-

vés de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación” (DOF, 8 de octubre de 2003). Si bien esta Ley a lo largo de veinte años ha sufrido 14 reformas, siempre ha mantenido la esencia de su objetivo, considerando tres tipos de residuos: peligrosos (RP), de manejo especial (RME) y los sólidos urbanos (RSU), cada categoría se describe en la tabla 18.1 (DOF, 8 de mayo de 2023).

Tabla 18.1. Definición y clasificación de los residuos

	Definición	Norma oficial
Peligroso (RP)	Residuos que poseen al menos una característica CRETIB (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y biológico-infecciosos).	NOM-052-SEMARNAT-2005, establece los criterios y un listado de RP.
Manejo especial (RME)	En esta clasificación considera los residuos que superan las 10 Ton/anuales o bien 27.3 kg/d (p.ej. mercados, residuos agrícolas, forestales, etc.) generados en procesos productivos o servicios que por su tamaño y componentes no son considerados RP o RSU.	NOM-161-SEMARNAT-2011, establece los criterios para clasificar los RME.
Sólido urbano (RSU)	Son los residuos que se producen en las casas, establecimientos y vía pública con características domiciliarias y los resultantes de actividades domésticas. Estos residuos se han subclasificado en orgánicos e inorgánicos.	La NOM-083-SEMARNAT-2003, establece las especificaciones de protección ambiental de sitios para la disposición final (SDP) de RSU y de RME.

Fuente: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (DOF, 2023).

Sin embargo, es hasta la elaboración del DBGIR 2006, donde se integran en un documento las tres categorías de residuos que prevalecen hasta la fecha, y aunque en ese momento no se contaba con una política nacional sobre cómo realizar la gestión de dichos residuos y de precisar las prioridades a seguir en cada caso, dicho instrumento puede ser considerado el inicio de la gestión de los residuos en nuestro país (Gutiérrez Avedoy, 2006; García-Mondragón et al., 2022).

En términos de la economía circular o lo que más adelante se convertiría en este concepto fue en el DBGIR 2012, que se incluye un sistema de información nacional para la gestión integral de los residuos, 3R (reutilizar, recuperar y reciclar) (INECC y Semarnat 2012). Y es hasta el DBGIR 2020, que se plasma el objetivo de, transformar el esquema tradicional del manejo de los residuos en un modelo de economía circular, para el aprovechamiento racional de los recursos naturales y favorecer el desarrollo sus-

tentable en el país (Semarnat, 2020); incluyendo el término de valorización material, así como el concepto de ciclo de vida de los residuos; dentro de la visión nacional hacia la gestión sustentable: cero residuos (García-Mondragón et al., 2022).

Etapas de la gestión integral de residuos sólidos

Generación

De acuerdo con datos del DBGIR 2020, la generación total de residuos en el país se estima en 120 128 t/día y la generación per cápita calculada fue de 0.944 kg/hab/día (Semarnat, 2020); cifra que aumento en un 3% (123 701 t/día) en el 2022 (INECC, 2022), pero la generación per cápita disminuyó a 0.847 kg/hab/día; siendo Baja California y Colima los Estados con menor generación, mientras que el Estado de México y la Ciudad de México (CDMX), los mayores generadores con 16 773 t y 13 149 t respectivamente (INECC, 2022) (figura 18.1).

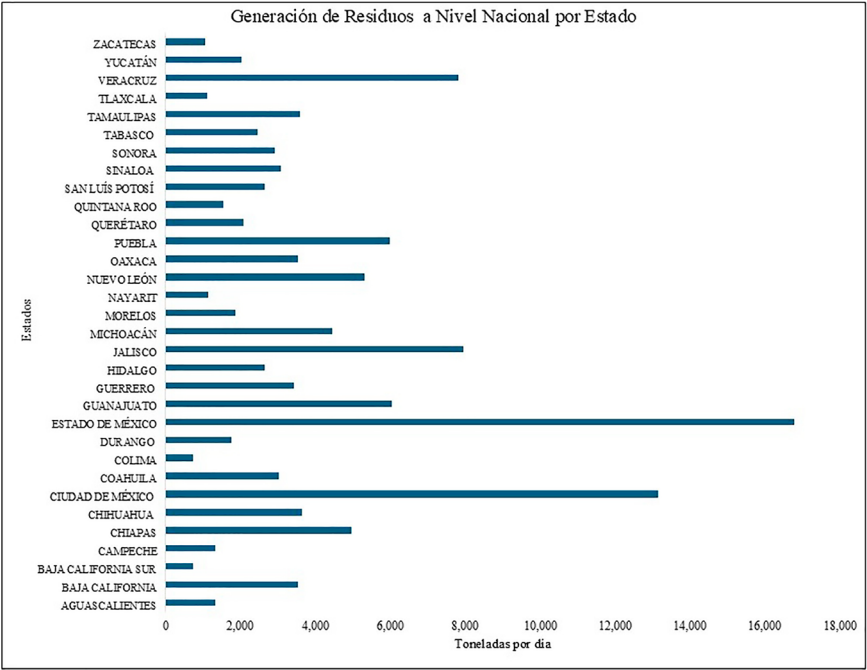
Recolección y transporte

De los residuos generados a nivel nacional se recolectan 100 751 t/día, para una cobertura a nivel nacional del 83.87% (Semarnat, 2020); 29 estados cuentan con más del 75% de recolección en sus municipios, dos con entre el 50 y 75% y solo Guanajuato tiene sistema de recolección en el 24% de sus municipios (figura 18.2) (INECC, 2022).

Transferencia

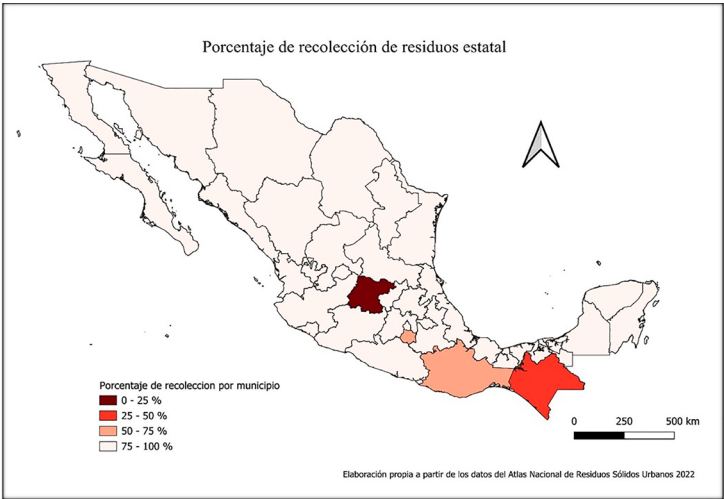
El DBGIR 2020 reporta que en el país existen 127 estaciones para la transferencia de los residuos, ubicadas en 112 municipios de 23 entidades federativas (Semarnat, 2020); a diferencia del Atlas Nacional en el que sólo se

Figura 18.1. *Generación de residuos generados por estado*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

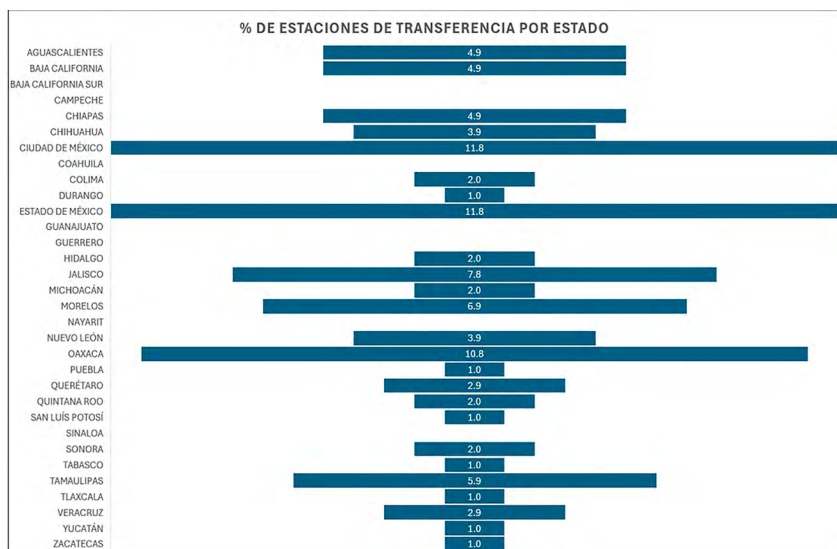
Figura 18.2. *Porcentaje de recolección de residuos estatal*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

reportan 102, de estos, 24 se encuentran en ubicados en el Estado de México y la CDMX, con 12 unidades cada entidad, mientras que 15 estados no tienen centros de transferencia o sólo tienen uno (figura 18.3) (INECC, 2022).

Figura 18.3. Porcentaje de estaciones de transferencia de residuos



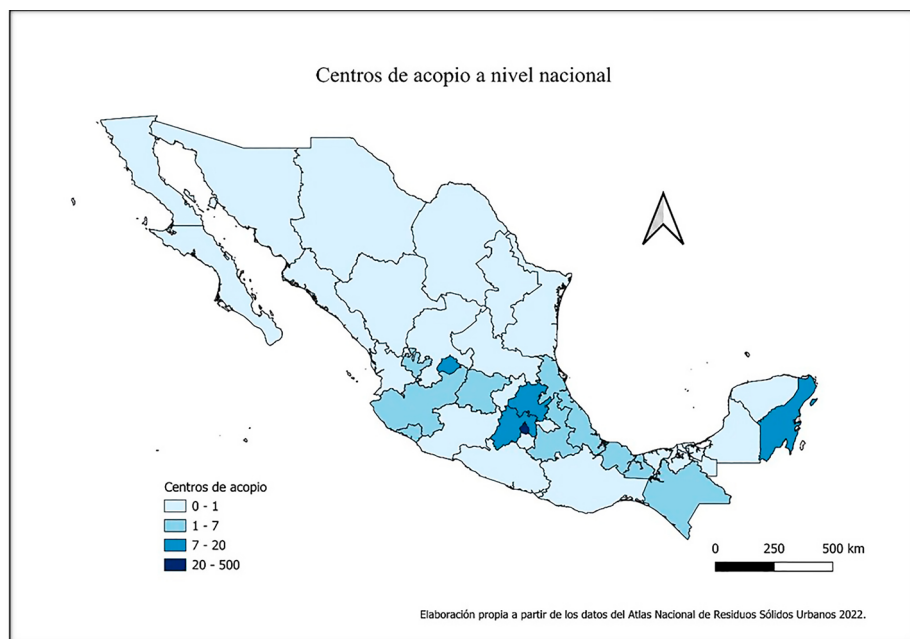
Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

Acopio

El acopio de residuos con potencial de aprovechamiento se realiza en instalaciones establecidas y operadas por los gobiernos estatales o municipales, con el objetivo de recibir los subproductos reciclables que han sido separados en la fuente de origen por los generadores, tanto a título gratuito como entregando a cambio algunos materiales, enseres o dinero (Semarnat, 2020).

No obstante, los datos recabados en el Atlas Nacional (2022) indican que 27 estados tienen menos de 10 centros de acopio en su territorio, mientras que en la CDMX existen 411 espacios dedicados al acopio de residuos inorgánicos, en los que se entrega una retribución económica o en especie (figura 18.4). El establecimiento de estos programas fue en el mar-

Figura 18.4. Distribución de los centros de acopio por estado



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

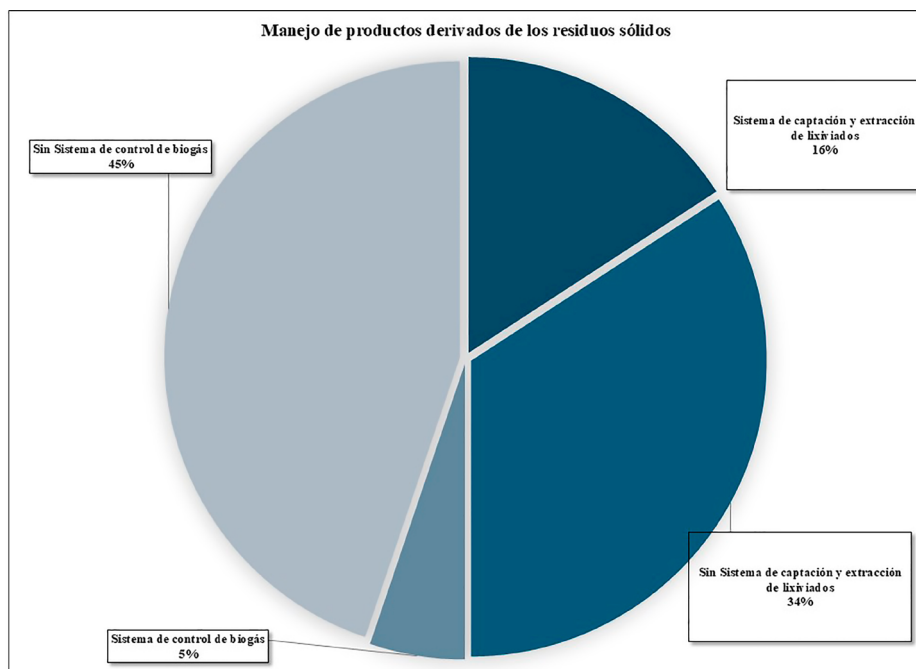
co de políticas dirigidas a la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos sólidos inorgánicos urbanos, aunque en el estricto sentido no es economía circular.

Disposición final y revalorización

El análisis de la infraestructura y procesos publicado en el DBGIR (2020), indican que, en los sitios de disposición final (SDF), el 16.30% cuentan con infraestructura para la captación de lixiviados, y el 9.67% con infraestructura para la captura de biogás; cifras similares a las publicadas en el Atlas Nacional (2022) con 16% de sistemas para captación de lixiviados y 5% de biogás (figura 18.5).

Entre las medidas que se han implementado para mitigar el impacto, en el cambio climático, por la generación de gases de efecto invernadero,

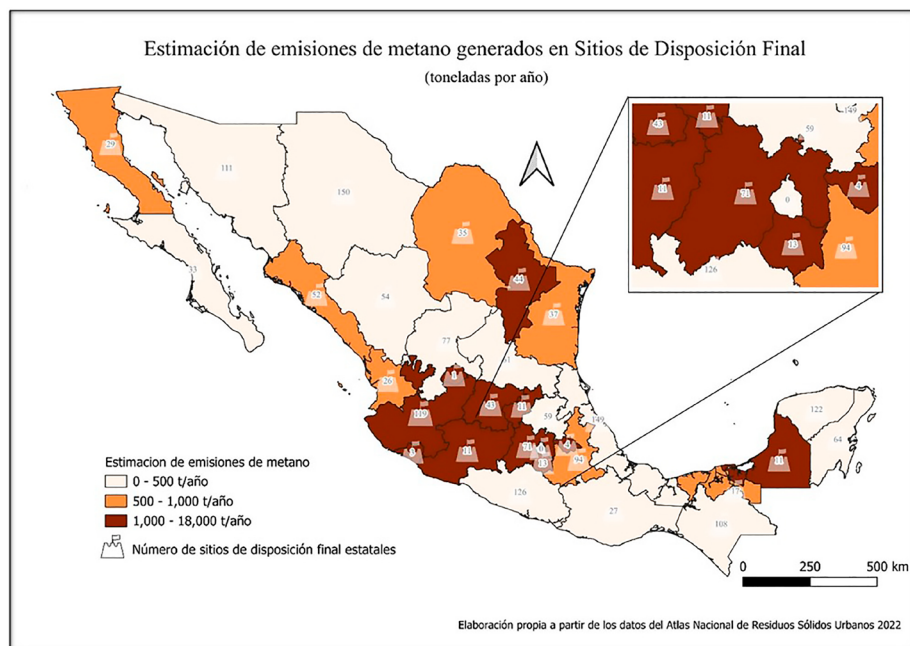
Figura 18.5. Manejo de lixiviados y biogás producido en los rellenos sanitarios



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

fue instalar sistemas para la captación y quema de biogás (figura 18.6), en aquellos rellenos sanitarios que dan servicio a más de 50 mil habitantes, con la finalidad de dar cumplimiento a los diversos tratados. En este sentido la CDMX es la única entidad que no genera metano, debido a que no cuenta con sitios de disposición final, sin embargo, sus emisiones se reflejan indirectamente en las zonas conurbadas, principalmente, el Estado de México. De acuerdo con el Atlas Nacional (2022), en el país existen 1 762 sitios de disposición, de los cuales Chihuahua y Veracruz presentan alrededor de 150, mientras que Aguascalientes, Colima y Tlaxcala tienen menos de 10 (figura 18.6).

Figura 18.6. *Estimación de emisiones de gas metano por sitios de disposición final y número de SDF*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

Flujo de los residuos

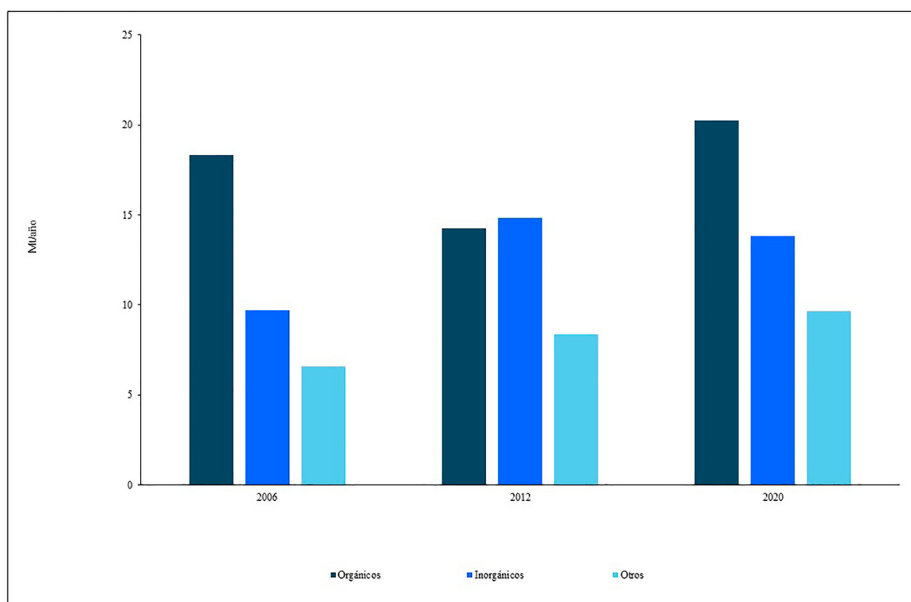
Considerando los volúmenes de generación diarios de RSU en México, la producción anual asciende a poco más de 43.8 millones de toneladas (Mt/año), de las cuales el 31.56% son inorgánicos, el 46.42% orgánicos y el porcentaje restante corresponde a residuos fuera de estas dos clasificaciones como: los residuos sanitarios, trapos, loza, etc. (Semarnat, 2020).

Los RSU, por su heterogeneidad, han sido subclasificados en la LGPGIR, en inorgánicos y orgánicos para facilitar su separación primaria, es decir en el origen, con la finalidad de valorizarlos (Art. 18 fracción reformada DOF, 19 de marzo de 2014). No obstante, la valorización sólo se enfocó en los residuos inorgánicos (papel y cartón, vidrio, metales y plásticos, principalmente) (Semarnat, 2020), a través de las 3r con el fin de promover una economía circular con enfoque del reciclaje (Moroch, 2018); acción

que ha tenido una buena respuesta por parte de la sociedad, pero que sigue siendo insuficiente al solo reciclarse el 9.6% del volumen de residuos inorgánicos recolectados que haciende a no más de 1.2 Mt/año (Semarnat, 2020). Es importante señalar que la economía del reciclaje no es economía circular, ya que no es restaurativa y regenerativa, ya que los productos, componentes y materias no mantienen su utilidad y valor máximo (Morsetto, 2020).

La situación de los residuos orgánicos es aún más alarmante, por sus volúmenes de generación, que en 2020 a nivel nacional superó en un 14.6% el volumen de los residuos inorgánicos (figura 18.1). La superioridad de residuos orgánicos se ha asociado con la situación económica, es decir, a menores ingresos mayor volumen de residuos orgánicos y a mayores ingresos predominaran los residuos inorgánicos (Kaza et al., 2017). En el 2012, la generación de residuos orgánicos (figura 18.7) suponía que el país migraba, hacia una menor cantidad, sin embargo, en el 2020 se evidenció lo contrario.

Figura 18.7. Volumen de generación de residuos urbanos



Fuente: elaboración propia a partir de DBGIR (2006, 2012 y 2020).

Si bien todos los residuos tienen un efecto negativo al ambiente, los residuos orgánicos por su naturaleza sirven como caldo de cultivo para vectores de enfermedades (roedores, moscas, cucarachas, etc.) (Hernández-Nazario et al., 2018) y, como consecuencia natural de su putrefacción, contribuyen en la emisión de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) y lixiviados (Anyakwu y Baroutian, 2018). Bajo este contexto, representantes de los distintos sectores propusieron planes y acciones para la reducción y tratamiento de residuos orgánicos a través de su aprovechamiento con plantas de compostaje y de digestión anaerobia para la obtención de energía en forma de biogás (LGPGIR, 2023; Semarnat, 2020).

Tratamiento y valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Hasta hace algunos años, la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) eran considerados de bajo valor. No obstante, las opciones de tratamiento de los FORSU han mejorado considerablemente. Mientras que al inicio lo más avanzado era la separación balística de los residuos aprovechables (separación por medio de cribado en función del tamaño y peso de partícula) (Pérez-Navarro, 2022), hoy en día la adopción de tecnologías más complejas, como las plantas de tratamiento mecánicas-biológicas (MBT, por sus siglas en inglés) ha tomado gran importancia (Lara-Topete et al., 2023).

Estas plantas, que combinan la separación mecánica de materiales recuperables con la estabilización biológica de la materia orgánica, han demostrado ser una opción eficiente para la gestión de RSU. Si bien su implementación exitosa lleva más de 30 años en países desarrollados, su adopción en países en desarrollo, como los de América Latina incluyendo a México, requiere estudios de viabilidad adicionales para asegurar su efectividad.

En México, las alternativas más empleadas para el tratamiento de la FORSU consistían principalmente en compostaje. Sin embargo, esta alternativa de tratamiento se enfoca principalmente en residuos orgánicos de mercados y centrales de abasto los cuales, por sus volúmenes de produc-

ción, son considerados residuos de manejo especial (RME). Si bien el tratamiento de los FORSU ha tomado gran importancia en años recientes, las técnicas y procedimientos para su tratamiento aún se encuentran restringidos y enfocados principalmente a los RME. Afortunadamente, estos procesos de tratamiento aplicados a los RME también son aplicables a la FORSU, pero las tendencias actuales implican llegar hasta la valorización del residuo, no solo a su tratamiento para disposición final.

Las nuevas tendencias apuntan hacia alternativas más sustentables para el manejo, tratamiento y valorización de la FORSU. Estas opciones se centran principalmente en la transformación de la FORSU en productos con valor agregado, como alimento para ganado o materiales de construcción (Orozco-Álvarez et al., 2025). Una alternativa emergente es la bioestabilización, que consiste en el uso de agentes biológicos, como organismos y/o microorganismos, capaces de degradar y transformar la materia orgánica en subproductos de interés biotecnológico, económico e industrial. Dentro de los procesos más representativos de bioestabilización se encuentran el compostaje y vermicompostaje, que producen compost, y la digestión anaerobia, que genera biogás (Aguiar et al., 2021).

Otras alternativas de bioestabilización de los FORSU incluyen la biodeshidratación o secado biológico, un proceso que aprovecha la energía generada por la actividad metabólica de los microorganismos presentes (Maia et al., 2023). Este tratamiento permite reducir significativamente el contenido de humedad de los FORSU, lo que facilita su manejo, disminuye el riesgo de putrefacción y evita la generación de lixiviados.

De acuerdo con el Atlas Nacional publicado en el 2022 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en México se tienen 16 plantas para el tratamiento de residuos orgánicos, 15 de ellas de compostaje y una de digestión anaerobia (INECC, 2022). Estos datos son inferiores a lo reportado en 2020 en DBGIR, que reportó 18 plantas de compostaje y cinco de digestión anaerobia (Semarnat, 2020). Sin embargo, ambos documentos coinciden en que la mayoría de las plantas se encuentran localizadas en el centro del país, ya que la CDMX y el Estado de México albergan siete y cuatro plantas de compostaje respectivamente, además cada entidad tiene una planta de digestión (Planta de Biodigestión Atlacomulco, Estado de México y Planta de digestión alcaldía de Milpa Alta), no obstante am-

bas plantas no procesa residuos orgánicos de origen domiciliario, sino RME de grandes generadores como restaurantes, mercados, rastros y agrícolas (residuos de nopal).

Si bien los datos no son precisos se reporta que se tratan poco más de 505 mil toneladas de residuos orgánicos urbanos al año, vía compostaje (INECC, 2022), una cantidad reducida e insuficiente para el volumen de residuos orgánicos que se generan en México. Respecto a la biodigestión, no hay valores reportados sobre la producción de energía renovable en forma de calor, electricidad o biogás. Sin embargo, el marco legal nacional si contempla la generación y comercialización de fuentes de energía renovables y tecnologías limpias (tabla 18.2).

Tabla 18.2. Marco legal vigente de fuentes renovables y tecnologías limpias

Alcance	Marco legal
Generación de fuentes de energía limpia	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética
	Ley de Bioenergéticos
	Ley de la Industria Energética
	Ley de la Comisión Reguladora de Energía
	Ley de Aprovechamiento Sustentable de Energía
	Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica

Fuente: Diagnósticos básicos para la gestión integral de los residuos (2020) y Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

Para lograr una economía circular de los residuos orgánicos en México, el flujo de los residuos debería seguir un enfoque integral y sostenibles.

- Separación en el origen
- Recolección selectiva
- Procesamiento y valorización
- Comercialización: mercado de compost y productos derivados
- Incentivos económicos, que fomenten la separación, la producción y el uso de los productos derivados de residuos orgánicos.
- Educación ciudadana y ambiental, que destaque la importancia de la separación y aprovechamiento de residuos, así como los beneficios ambientales de esto.

La implementación de un flujo de residuos podría reducir su cantidad en los vertederos y generar productos derivados como biofertilizantes y energía renovable de forma sostenible.

El aprovechamiento de los residuos conocido como “Waste to Energy” es una estrategia que considera a los residuos orgánicos como materia prima para generar energía, que se planteó en 2017 como una alternativa viable para recuperar energía en forma de calor, electricidad o combustibles alternos, como el biogás, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de los desechos orgánicos y gestionarlos de manera segura (Mutz et al., 2017).

Casos de estudio

Uno de los casos más destacados en la revalorización de los FORSU es la planta de compostaje de Bordo Poniente, ubicada en la CDMX. Esta planta no solo representa un éxito a nivel nacional, sino que se considera la experiencia más significativa en América Latina y el Caribe, debido a su capacidad instalada de tratamiento de 2 500 toneladas por día (Manzi Tarapués et al., 2020). La producción de compost de calidad tipo B, adecuado para su uso en agricultura y áreas verdes, constituye uno de los principales atractivos de esta instalación.

Por otro lado, otra alternativa prometedora para la valorización de residuos orgánicos y la mitigación del cambio climático es reemplazar la combustión de los residuos por pirólisis, un proceso que convierte los residuos en biocarbón (Galindo-Segura et al., 2023). El biocarbón, además de su potencial para la remediación de suelos agrícolas, ha demostrado ser efectivo en la descontaminación de aguas y suelos, debido a su capacidad como material adsorbente de metales pesados, herbicidas y colorantes (Ghani et al., 2022; Kumar et al., 2022).

La obtención de biocombustibles a partir de la FORSU como el etanol (Flores et al., 2019), el biodiesel a partir de aceites usados (León et al., 2024) o el biogás a partir de residuos orgánicos y de nopal (Vázquez-Mata et al., 2022) son ejemplos de casos de éxito enfocados en la revalorización de la FORSU en México. Estas alternativas biotecnológicas resultan eficien-

tes para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de bioenergía, con un alto desarrollo industrial que la convierte en una opción ideal para diversos procesos. Sin embargo, para mejorar la viabilidad económica, es necesario aumentar la capacidad de tratamiento de las plantas de revalorización de los residuos, ya que los costos de instalación y operación aún son elevados.

Existen diversas líneas de investigación que buscan optimizar la productividad de los sistemas de bioestabilización, como el aumento de temperatura o la digestión en fase sólida, lo cual podría reducir el tamaño de los digestores. Para superar los problemas derivados de compuestos inhibitorios, se están evaluando aditivos como adsorbentes y bioelectrodos (Ellacuriaga et al., 2021), que protegen la biomasa microbiana y aceleran la degradación de intermediarios. Estas estrategias pueden reducir los costos de inversión y operación, haciendo de la digestión anaerobia un proceso clave en el modelo de economía circular, permitiendo la producción de bioenergía y el reciclaje de nutrientes y compuestos intermedios.

Es importante recalcar que actualmente existen muchas alternativas para la valorización de los FORSU. Sin embargo, muchos de ellos incluidos algunos de los aquí mencionados, aún se encuentran en etapa de estudio a nivel laboratorio o pequeña escala. Las tendencias indican que es viable incrementar la capacidad de tratamiento y valorización de los FORSU. Además, con la valorización de los FORSU se justifica plenamente la inversión inicial de los sistemas de tratamiento, pues el retorno de la inversión es seguro con la comercialización de los subproductos generados en el tratamiento.

Conclusiones

Los residuos sólidos urbanos se han convertido en un desafío, con una mayor generación de residuos y composiciones materiales más complejas, que a menudo se mezclan con elementos tóxicos y peligrosos. El flujo de residuos es complejo, por el sistema de gestión que, aunque se ha propuesto en la legislación, es rebasado por la linealidad de consumo. Si bien hay un filtrado de residuos inorgánicos, la problemática de los residuos orgáni-

cos sigue sin ser atendida, aun y cuando suponen factores de riesgo biótico y abióticos. Sin embargo, si los residuos orgánicos son recolectados desde su origen, pueden ser materia prima para la generación de productos de valor energético.

Referencias

- Aguiar, S., Arboleda, L. y Uvidia, H. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Alfa*, 5(15), 649-660. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.145>
- Anyaku, C. C. y Baroutian, S. (2018). Decentralized anaerobic digestion systems for increased utilization of biogas from municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 982-991. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.009>
- Cervantes Zepeda, I., Gallegos Alarcón, I., García Mondragón, D. y González Blanco, G. (2022, septiembre-diciembre). Cronología de la legislación de residuos en México. *La Ciencia y el Hombre*, (3), 44-47.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688657&fecha=08/10/2003
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2023). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos (Reforma publicada el 8 de mayo de 2023). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- Ellacuriaga, M., García-Cascallana, J. y Gómez, X. (2021). Biogas production from organic wastes: Integrating concepts of circular economy. *Fuels*, 2(2), 144-167. <https://doi.org/10.3390/fuels2020009>
- Flores, R. O., Muñoz, A. S., Medina, A. G. y Conrado, K. P. (2019). Análisis de factibilidad de un proceso de producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos como alternativa sustentable al manejo de residuos sólidos urbanos. *Jóvenes en la Ciencia*, 5(1).
- Galindo-Segura, L. A., Pérez-Vázquez, A., Ramírez-Martínez, A., López-Romero, G. y Gómez-Merino, F. C. (2023). El manejo del bagazo de naranja en la zona centro del estado de Veracruz. *Terra Latinoamericana*, 41.
- García-Mondragón, D., Cervantes-Zepeda, I., Gómez-Demetrio, W., Gallego-Alarcón, I., García-Pulido, D. y González-Blanco, G. (2023). Gestión de los residuos sólidos en México: Análisis cualitativo de los diagnósticos básicos. *Inter Disciplina*, 11(30), 215-242. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2023.30.81788>
- Ghani, J., Nawab, J., Khan, S., Khan, M. A., Ahmad, I., Ali, H. M., ... y Dinelli, E. (2022). Organic amendments minimize the migration of potentially toxic elements in soil-plant system in degraded agricultural lands. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 6547-6565. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02816-3>
- Gutiérrez Avedoy, V. (Coord.). (2006). *Diagnóstico básico para la gestión integral de resi-*

- duos (DBGIR)*. Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196519/Diagnostico_basico_pgir_2006.pdf
- Hernández-Nazario L., Benítez-Fonseca M. y Bermúdez-Torres J. M. (2018). Caracterización fisicoquímica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el centro-urbano Abael Samaría de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 38(2), 369-379.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2022). *Atlas nacional de residuos sólidos urbanos*.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. y Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., Chakraborty, S., Owens, G. y Naushad, M. (2022). Valorization of fruit waste-based biochar for arsenic removal in soils. *Environmental Research*, 213, 113710. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113710>
- Lara-Topete, G. O., Robles-Rodríguez, C. E., Orozco-Nunnelly, D. A., Vázquez-Morillas, A., Bernache-Pérez, G. y Gradilla-Hernández, M. S. (2023). A mini review on the main challenges of implementing mechanical biological treatment plants for municipal solid waste in the Latin America region: Learning from the experiences of developed countries. *Waste Management & Research*, 41(7), 1227-1237. <https://doi.org/10.1177/0734242X231154143>
- León, J. C. T., Alfaro, T. A. y Palomino, G. I. B. (2024). Optimización de los parámetros de producción del biodiésel a partir de aceite usado de las pollerías. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 7(1), 20-35. <https://doi.org/10.51343/racs.v7i1.1481>
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). (2023). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- Maia, G. D., Horta, A. C. y Felizardo, M. P. (2023). From the conventional to the intermittent biodrying of orange solid waste biomass. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 188, 109361. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109361>
- Manzi Tarapué, V., Rendón Muñoz, L. I., Herrera Rodas, M., Gandini Ayerbe, M. A. y Marmolejo Rebellón, L. F. (2020). Estado de la valorización de biorresiduos de origen residencial en grandes centros urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 755-774. <https://doi.org/10.20937/rica.53341>
- Morocho, F. R. A. (2018). La economía circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo. *Innova Research Journal*, 3(12), 78-98.
- Morseletto, P. (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4), 763-773. <https://doi.org/10.1111/jiec.12987>

- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugl, C. y Groos, T. (2017). *Waste-to-energy options in municipal solid waste management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Orozco-Álvarez, C., Gervacio-Hernández, A., Moreno-Rivera, M. D. L., Piña-Guzmán, B. y Robles-Martínez, F. (2025). Microbiological and physicochemical characterization during biodrying of organic solid waste. *Processes*, 13(1), 78. <https://doi.org/10.3390/pr13010078>
- Pérez Navarro, S. B. (2022). *Análisis comparativo de la normatividad y gestión sobre residuos sólidos urbanos en México y Japón*.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Tello Espinoza, P. (2018). Política y legislación de la gestión de los residuos en América Latina y el Caribe. En P. Tello Espinoza, D. Campani y D. R. Sarafian (Eds.), *Gestión integral de residuos sólidos urbanos*. (pp. 13-34). AIDIS. <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/08/GESTION-INTEGRAL-DE-RESIDUOS-SOLIDOS-URBANOS-LI-BRO-AIDIS.pdf>
- Vázquez-Mata, N., Acosta-Camacho, P., Camacho-Parra, E., Rocha-Mendoza, D. y Cano, I. G. (2022). Aprovechamiento de subproductos y residuos generados en la Central de Abastos de la Ciudad de México. *Biotecnología y Sustentabilidad*, 7(1), 119-140.