

# Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad  
Michoacana  
de San Nicolás  
de Hidalgo

## Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano

## Solid waste management and artificial intelligence in the mexican context

Juan Manuel Sánchez Yáñez y Liliana Márquez Benavides\*

**Para citar este artículo:** Sánchez Yáñez JM, Márquez Benavides L (2024). Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano. *Ciencia Nicolaita* 90: 157-168.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.722>



### Historial del artículo

Recibido: 25 de mayo de 2023

Aceptado: 10 de noviembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



**Ver material suplementario**



**\*Correspondencia de autor:** [liliana.marquez@umich.mx](mailto:liliana.marquez@umich.mx), ORCID: 0000-0003-3738-6608.



**Términos y condiciones de uso:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



**Envíe su manuscrito a esta revista:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

# Gestión de residuos sólidos y la inteligencia artificial en el contexto mexicano

## Solid waste management and artificial intelligence in the mexican context

Juan Manuel Sánchez Yáñez<sup>1</sup> y Liliana Márquez Benavides<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Microbiología Ambiental. Edif-B1, CU. Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Fco. J. Mujica s/n, Col. Felicitas del Río, Morelia, Mich, México.

<sup>2</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Carretera Morelia-Zinapécuaro km 9.5, Tarímbaro, Mich. México.

### Resumen

En México, la gestión de residuos sólidos varía de acuerdo con cada municipio. Las prácticas inadecuadas y tasas limitadas de reciclaje generan graves consecuencias ambientales. La inteligencia artificial (IA) tiene el potencial de aumentar la eficiencia en la gestión de residuos, por ejemplo, al utilizar sistemas de clasificación para agilizar el proceso de reciclaje. Además, los dispositivos inteligentes pueden desempeñar un papel crucial al separar diferentes materiales de manera precisa durante este proceso. Sensores basados en Internet de las cosas (IoT o *Internet of things*) permiten el monitoreo en tiempo real de los contenedores, optimizando la gestión de residuos. La implementación de la IA reduce costos y asigna mejor los recursos, generando ventajas económicas. Sin embargo, se enfrentan desafíos como la disponibilidad de datos y limitaciones en infraestructura y financiamiento. La integración exitosa de la IA en la gestión de residuos en México requiere abordar estos desafíos específicos.

**Palabras clave:** residuos sólidos; smart waste; inteligencia artificial; gestión de residuos.

\*Autor de correspondencia: [liliana.marquez@umich.mx](mailto:liliana.marquez@umich.mx), ORCID: 0000-0003-3738-6608.  
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



## Abstract

In México, solid waste management varies according to each municipality. Inadequate practices and limited recycling rates generate serious environmental consequences. Artificial intelligence (AI) has the potential to increase efficiency in waste management, for example, by using AI-based sorting systems to streamline the recycling process. In addition, smart devices can play a crucial role in accurately separating different materials during the recycling process. Internet of things (IoT)-based sensors enable real-time monitoring of containers, optimizing waste management. The implementation of AI would reduce costs and better allocate resources, generating economic advantages. However, challenges such as data availability and limitations in infrastructure and financing are faced. Successful integration of AI into waste management in México requires addressing these specific challenges.

**Keywords:** solid waste; smart waste; artificial intelligence; waste management.

## Introducción

Los residuos sólidos se pueden definir como el material o producto que se desecha una vez que es consumido o utilizado por el usuario y que pueden provenir de distintas fuentes como domicilios, oficinas, centros comerciales, centros de producción, entre otros (Ceballos Pérez *et al.*, 2022). Los residuos pueden clasificarse en:

- 1) Residuos sólidos urbanos (RSU), que son los generados en las actividades domésticas.
- 2) Residuos de manejo especial (RME), que son generados en procesos productivos o por grandes generadores de residuos.
- 3) Residuos peligrosos (RP), los cuales pueden presentar al menos una de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o contener agentes infecciosos.

En México, la infraestructura y los sistemas de gestión de residuos sólidos varían según las regiones y municipios. De acuerdo con la SEMARNAT (2020), se estima que a nivel nacional se generan diariamente 120,128 toneladas de RSU, de los cuales en promedio se recolecta el 84%, lo que significa una cobertura a nivel nacional de 100,751 toneladas de residuos al día. El nivel de recolección más bajo se registra en la zona sur del país donde sólo alcanza el 69%. Mientras que

algunas áreas cuentan con prácticas bien establecidas de gestión de residuos, otras enfrentan desafíos significativos. La infraestructura para la gestión de residuos debiera incluir la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos. Las brechas en la cobertura y eficiencia, especialmente se dan en las áreas rurales y de bajos ingresos. Los sistemas de gestión de residuos sólidos a menudo involucran una combinación de servicios municipales, recolectores informales de residuos y participación del sector privado.

En México, como en el caso de muchos otros países, el aumento en la generación de residuos sólidos está ligado al gasto del consumo final privado y el producto interno bruto (PIB) nacional (SEMARNAT, 2018). Es decir, a mayores niveles de consumo se produce un mayor volumen de residuos. En el caso mexicano, entre 2003 y 2012, el PIB y la generación de residuos tuvieron un incremento similar en cuanto a la tasa anual, cerca del 2.77%. Información oficial mexicana publicada en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR), reporta una generación per cápita de 0.944 kg/hab/día (SEMARNAT, 2020). En los últimos años, a la par del crecimiento poblacional, se ha incrementado la oferta y consumo de productos y servicios, dando como resultado la generación de RSU en mayores cantidades. A su vez, los núcleos poblacionales, cada vez más grandes, dificultan la recolección de los RSU y la implementación de áreas o

terrenos para la disposición final y tratamiento de estos (Kaza *et al.*, 2018). Por lo tanto, las prácticas inadecuadas en la gestión de residuos en México tienen implicaciones económicas.

La disposición inadecuada de residuos conduce a un aumento en los costos asociados con la gestión integral de residuos, la remediación ambiental y los gastos relacionados con la salud. El artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión, 2023), indica que los municipios, como gobiernos locales, tienen a su cargo el servicio público del manejo de RSU y el cobro por el mismo, que debería ser destinado a la operación, sin embargo, para la mayoría de los municipios estos recursos suelen ser limitados. Además, los métodos ineficientes de recolección y disposición de residuos resultan en la pérdida de recursos, disminución de oportunidades para el reciclaje y compostaje, y mayores costos en general.

Las prácticas inadecuadas de disposición de residuos y las tasas limitadas de reciclaje en México contribuyen a consecuencias ambientales evidentes: por ejemplo, los vertederos sin prácticas adecuadas de ingeniería ni gestión representan riesgos de contaminación del suelo y agua, contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero. En México se cuenta con 2,203 sitios de disposición final, que se encuentran ubicados en 1,722 municipios, de estos, al menos 883 no realizan alguna acción o proceso para el tratamiento de los RSU (SEMARNAT, 2020). Las tasas insuficientes de reciclaje llevan al agotamiento de recursos naturales y un aumento en la demanda de materias primas. Aun así, según ECOCE (2021), México es líder en reciclaje de PET en América Latina, con un 60%, respectivamente.

El impacto ambiental de las prácticas de gestión de residuos en México se extiende más allá de los vertederos. El país enfrenta desafíos relacionados con la disposición de RP, como los residuos electrónicos, que contienen metales pesados que pueden filtrarse en el medio ambiente si no se manejan adecuadamente (Muñoz Cruz y Morales Calderón, 2023).

Fomentar el reciclaje, promover prácticas sostenibles de gestión de residuos y mejorar la infraestructura de residuos son pasos cruciales para reducir la huella ambiental de la gestión de residuos sólidos en

México, a su vez, estas prácticas requieren de una estrategia o políticas encaminadas a la gobernanza ambiental de los RSU (Juárez de la Rosa *et al.*, 2023), sin embargo, los diferentes contextos políticos y el cambio de gobiernos en México dificulta su implementación y continuidad, para que las políticas públicas tengan éxito.

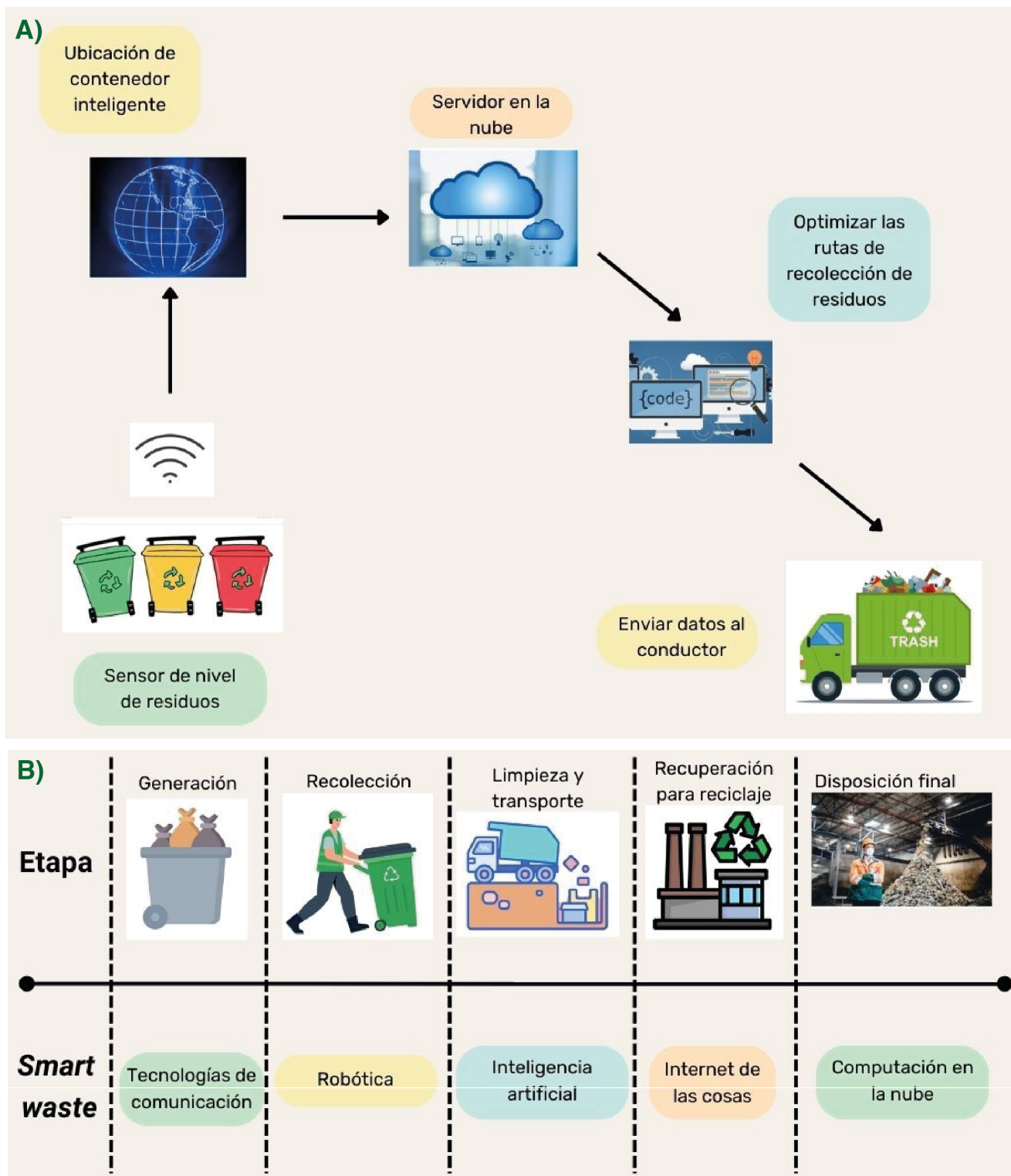
Abordar estos desafíos requiere enfoques innovadores, como la integración de la inteligencia artificial (IA) en las prácticas de gestión de residuos. La inteligencia artificial se centra en la creación de máquinas inteligentes capaces de simular la inteligencia y el comportamiento humanos (Moreno, 2019). Las siguientes secciones explorarán las posibles aplicaciones de la IA para abordar estos problemas y discutir los beneficios, desafíos e implicaciones asociadas en el contexto mexicano.

## **El sistema de gestión de residuos sólidos y las aplicaciones potenciales de *smart-waste* (residuos inteligentes)**

El enfoque de la *gestión de residuos inteligente* (*smart waste*) consiste en asociar los residuos físicos con la información digital (Figura 1).

En el contexto de la gestión de residuos sólidos, la integración de la IA en los sistemas de clasificación de residuos tiene un potencial significativo para mejorar la eficiencia y las tasas de reciclaje. Las tecnologías de robótica impulsada por IA y visión por computadora pueden revolucionar el proceso de clasificación de residuos sólidos en México. Los usuarios suelen ser reacios a separar sus residuos. Sin embargo, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, se pueden desarrollar sistemas inteligentes capaces de identificar y clasificar automáticamente diferentes tipos de residuos.

Al automatizar el proceso de clasificación, se mejora significativamente la velocidad y precisión de la segregación de residuos. Las prácticas tradicionales de clasificación de residuos en México, y el mundo, a menudo dependen del trabajo manual, lo que puede llevar tiempo y propiciar errores (Fang *et al.*, 2023). Los algoritmos de IA pueden analizar datos visuales capturados por sensores o cámaras, identificar y categorizar rápidamente diferentes tipos de materiales, y clasificarlos en contenedores o corrientes apropiadas.



**Figura 1.** Diagrama del uso de *smart waste* que abarca la generación hasta la recolección de residuos sólidos. **A)** La gestión integral de los residuos sólidos urbanos incluye varias etapas, desde la generación, la recolección, el proceso de limpia, la recuperación para reciclaje y/o pretratamiento y la disposición final en un relleno sanitario o vertedero. **B)** Etapas de la gestión de los residuos sólidos urbanos y su relación con el *smart waste*. Se muestra cada etapa y la relación que comúnmente se asocia con algunas opciones.

Esto agilizaría el proceso de separación de residuos en plantas de reciclaje, reduciendo los tiempos y los costos asociados (Ihsanullah *et al.*, 2022).

Por otra parte, México enfrenta desafíos relacionados con las tasas desiguales de reciclaje y la contaminación de materiales reciclables. Los sistemas de clasificación de residuos integrados con IA pueden desempeñar un papel crucial en la solución de estos problemas. Al identificar y clasificar con precisión los

materiales reciclables, estos sistemas permiten procesos de reciclaje más eficientes, al tener una mayor recuperación de recursos valiosos y reducir la cantidad de materiales reciclables que terminan en vertederos. En la Tabla 1 se muestran ejemplos de literatura sobre el desarrollo y aplicación de sistemas de clasificación de residuos impulsados por IA, que abarcan lo recién mencionado.

**Tabla 1.** Ejemplos de literatura sobre el desarrollo y aplicación de sistemas de clasificación impulsados por IA.

Autor	Tipo de IA empleada	Sistema de clasificación
Li y Chen (2023)	Técnicas de aprendizaje profundo ( <i>deep learning</i> ) para redes neuronales convolucionales (CNN).	Reconocimiento de residuos en una cinta transportadora, clasificándolos en 6 clases: cartón, metal, vidrio, plástico, papel y desechos orgánicos.
Zhang <i>et al.</i> , (2021)		Algoritmo de reconocimiento-recuperación de dos etapas para la clasificación de residuos. La primera etapa involucra un modelo de reconocimiento para clasificar los residuos en trece categorías. La segunda etapa entrena al modelo de reconocimiento-recuperación para clasificar los desechos en cuatro categorías.
Seredkin <i>et al.</i> , (2019)	Técnicas de aprendizaje profundo ( <i>deep learning</i> ) para redes neuronales convolucionales (CNN).	Detección y clasificación de residuos en una línea transportadora mediante el procesamiento de imágenes a través de redes neuronales detectando 4 clases de residuos: HDPE, aluminio, PET (sin distinción de color) y otros
Sousa <i>et al.</i> , (2019)	Técnicas de aprendizaje profundo ( <i>deep learning</i> ) para redes neuronales convolucionales (CNN).	Clasificación e identificación de residuos en bandejas de alimentos, se clasifican en cuatro categorías según el material o diez categorías según la forma.
Du <i>et al.</i> , (2022)	Modelo de aprendizaje profundo basado en una red neuronal convolucional (CNN)	Modelo de clasificación de residuos textiles, se puede clasificar en 13 categorías según el material, con un tiempo de reconocimiento de menos de dos segundos y una tasa de precisión del 95.4 %.
Thumiki y Khandelwal (2022)	Aplicación móvil en tiempo real y uso de red neuronal convolucional (CNN)	Utiliza el reconocimiento de imágenes y una red neuronal convolucional para clasificar los residuos en seis categorías según el material y determinar si son reciclables o no reciclables.

**Análisis predictivo y optimización**

El análisis predictivo y las técnicas de optimización impulsadas por IA pueden proporcionar conocimientos valiosos para mejorar los procesos de toma de decisiones en la gestión de residuos sólidos en México.

Los algoritmos de IA pueden analizar datos históricos sobre la generación de residuos, la demografía de la población y otros factores relevantes para predecir sus patrones de generación en las ciudades. Al aprovechar los algoritmos de aprendizaje automático, las





autoridades pueden predecir el volumen y la composición de los residuos generados en diferentes áreas y planificar sus recursos. Esto permite una mejor programación de la recolección, asignación de personal y equipos, y una gestión más eficiente de los recursos, ya que, aproximadamente 70-80% del presupuesto destinado se ocupa en el proceso de recolección y transporte en las diferentes rutas (Sulemana *et al.*, 2018), lo cual involucra los combustibles, mantenimiento de parque vehicular y pago de sueldos al personal operador.

Los algoritmos de IA pueden optimizar las rutas de recolección de residuos en función de factores como la densidad de generación de residuos, los patrones de tráfico y los datos en tiempo real sobre los niveles de llenado de los contenedores. Al analizar estas variables, la IA puede ayudar a identificar las rutas más eficientes, minimizando las distancias de viaje, el consumo de combustible y los costos asociados. Además, las rutas de recolección de residuos optimizadas pueden reducir las emisiones de los vehículos, lo que tiene un impacto ambiental positivo al reducir la huella de carbono de las operaciones de gestión de residuos. El trabajo que desarrollaron Akdas *et al.*, (2021), es un método para el enrutamiento de vehículos, en el que se emplea un algoritmo de optimización de colonias de hormigas, los autores recopilaban información de 110 puntos de un municipio de Estambul, Turquía, posteriormente los convirtieron en coordenadas para usar en una base de datos, visualizaron los datos en un mapa y se creó una matriz de distancias, que el algoritmo de optimización de colonias de hormigas analizó para determinar la ruta más corta, con ello se redujo la distancia de transporte en un 13% (Fang *et al.*, 2023). Otro ejemplo es el trabajo de Akhtar *et al.*, (2017), que, mediante el desarrollo de un algoritmo de búsqueda de retroceso para optimizar las rutas de recolección de residuos, reportaron un aumento de eficacia del 36.7% en la recolección. Este algoritmo se alimentó de los datos que proporcionaron los contenedores inteligentes y que sirvieron para encontrar un rango óptimo para reducir la cantidad y distancia de los contenedores instalados.

## Monitoreo y gestión inteligente de residuos

Los sistemas de monitoreo y gestión inteligente de residuos, al emplear el aprovechamiento de sensores basados en IoT y análisis de datos, ofrecen soluciones innovadoras para mejorar las prácticas de gestión de residuos, al implementar sensores basados en IoT en contenedores, se pueden monitorear y recopilar datos en tiempo real sobre los niveles de llenado. Los contenedores inteligentes son herramientas que clasifican rápidamente los residuos al utilizar algoritmos de aprendizaje automático (Fang *et al.*, 2023; Yigitcankar y Cugurullo, 2020). Los sensores IoT utilizan tecnologías como sensores ultrasónicos o infrarrojos para medir los niveles de residuos dentro de los contenedores. Los datos recopilados se pueden transmitir de forma inalámbrica a un sistema centralizado. Los análisis de datos impulsados por IA pueden procesar esta información sobre patrones de generación de residuos, optimizar los horarios de recolección y mejorar la eficiencia general del proceso. Chaudhari *et al.*, (2019), desarrollaron un contenedor inteligente construido sobre una plataforma basada en un microcontrolador Raspberry pi Uno, el cuál interconectaron a un módem GSM, a un sensor ultrasónico y a un sensor de peso para calcular el peso de los contenedores de basura. El microcontrolador Raspberry se programó para que, una vez llenado el cubo de basura, el sensor ultrasónico active el módem GSM que advierte de manera persistente al personal requerido hasta que se recolecte la basura por el camión. El monitoreo en tiempo real permite a los municipios estar informados sobre las capacidades de los contenedores. Otro ejemplo de aplicación de gestión efectiva sería la de los RP y los residuos infecciosos en hospitales, crucial para mantener un entorno seguro e higiénico. Se puede aprovechar la IA para predecir los niveles de llenado de los contenedores de residuos peligrosos y optimizar los horarios de recolección de residuos dentro de las instalaciones hospitalarias. Este enfoque proactivo permitiría a los hospitales garantizar una disposición oportuna y minimizar el riesgo de contenedores desbordados (Kumar *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2023).

A través de la implementación de sistemas de monitoreo de residuos impulsados por IA, los hospitales pueden monitorear continuamente áreas de almace-

namiento de residuos peligrosos, unidades de eliminación y procesos de transporte. El monitoreo en tiempo real proporciona información sobre los niveles de residuos, lo que permite tomar medidas rápidas para prevenir derrames, fugas u otros incidentes que podrían comprometer la seguridad de los pacientes, el personal sanitario y el medio ambiente (Hosseini *et al.*, 2022). Al analizar datos sobre patrones de generación de residuos, flujo de pacientes y actividades operativas, los algoritmos de IA pueden ofrecer recomendaciones para optimizar la ubicación de los contenedores de residuos, mejorar las prácticas de segregación de residuos y optimizar los flujos de trabajo.

### La integración de IA en la gestión de residuos sólidos en México

Con base en los ejemplos mencionados con anterioridad, podemos decir que la integración de IA en la gestión de residuos sólidos en México conlleva una serie de beneficios que abarcan aspectos económicos, ambientales y sociales. Dentro de las ventajas económicas, se puede mencionar la reducción del consumo de combustible y los costos operativos asociados al transporte. Al aprovechar la IA, los municipios pueden tomar decisiones informadas sobre inversiones en infraestructura, asegurando la utilización óptima de los recursos y maximizando el retorno de la inversión.

En cuanto a los beneficios ambientales, con los sistemas de clasificación de residuos impulsados por IA, se mejora la precisión y eficiencia de los procesos de reciclaje, garantizando la categorización y separación adecuadas, reduciendo la contaminación y mejorando la calidad de los materiales reciclables, contribuyendo así a conservar los recursos naturales y disminuir el impacto ambiental de la eliminación de residuos, también minimizaría las emisiones de los vehículos recolectores.

Los impactos sociales positivos por las prácticas eficientes de gestión de residuos, impulsadas por tecnologías de IA incluyen mejoras a la salud pública al reducir el riesgo de transmisión de enfermedades y la contaminación ambiental, ya que se puede minimizar el desbordamiento de los contenedores y la basura en las calles, mejorando la limpieza y estética de los espacios públicos. Además, la integración de la IA puede empoderar a los pepenadores al proporcionarles con-

diciones de trabajo más seguras y organizadas. Los sistemas de clasificación impulsados por IA facilitan la separación de materiales reciclables, lo que hace que el proceso de recolección de residuos sea más eficiente y menos peligroso. Este empoderamiento no solo mejoraría la calidad de vida de los pepenadores, sino que también reconocería su valiosa contribución a la cadena de valor del reciclaje.

### Implicaciones éticas y sociales en el contexto mexicano

La integración de la IA en la gestión de residuos sólidos en México plantea importantes consideraciones éticas y sociales que deben abordarse cuidadosamente para garantizar la equidad, privacidad e inclusión.

En las preocupaciones de privacidad es crucial establecer medidas sólidas de protección de datos para salvaguardar la privacidad de las personas y las comunidades. La transparencia en las prácticas de recopilación de datos, el consentimiento informado y el almacenamiento seguro de datos son esenciales para generar confianza entre la población usuaria. Es importante asegurar que los datos recopilados se utilicen únicamente con fines de gestión de residuos y que la información personal o sensible se maneje con el mayor cuidado y cumplimiento de las regulaciones de privacidad correspondientes.

En la adopción de tecnologías de IA en la gestión de residuos, es fundamental garantizar un acceso equitativo y una distribución de beneficios justa entre los diferentes grupos socioeconómicos en México. Esto incluye abordar la brecha digital para garantizar que las comunidades marginadas y las áreas desatendidas tengan acceso a soluciones de gestión de residuos impulsadas por IA. Se deben realizar esfuerzos para cerrar la brecha tecnológica y proporcionar capacitación y apoyo a las comunidades para utilizar de manera efectiva las herramientas de IA. Además, se deben desarrollar estrategias para garantizar que los beneficios de la integración de la IA, como ahorros económicos y servicios mejorados, lleguen a todos los segmentos de la sociedad, minimizando las disparidades y promoviendo la inclusión social.

La integración de la IA en la gestión de residuos puede implicar cambios en los roles laborales y potencialmente resultar en la pérdida de empleo para los





trabajadores del sector. Es crucial abordar este problema de manera proactiva mediante la implementación de políticas y programas que brinden oportunidades de capacitación y mejora de habilidades. Al invertir en programas de capacitación vocacional y educación, los trabajadores pueden adquirir las habilidades necesarias para adaptarse al cambiante panorama de la gestión de residuos. La colaboración entre el gobierno, la industria y las instituciones educativas puede desempeñar un papel vital en el desarrollo de iniciativas que aseguren una transición fluida para los trabajadores, permitiéndoles participar y beneficiarse de la transformación impulsada por la IA en el sector.

Las consideraciones éticas y las implicaciones sociales deben estar en primer plano en la integración de la IA en la gestión de residuos sólidos en México. Respetar la privacidad, garantizar el acceso equitativo y abordar las preocupaciones sobre la pérdida de empleo son clave para construir un sistema de gestión de residuos sostenible e inclusivo impulsado por la IA que beneficie tanto al medio ambiente como a la sociedad mexicana en su conjunto.

## Desafíos tecnológicos y limitaciones en el contexto mexicano

### *Disponibilidad y calidad de los datos para los algoritmos de IA en los sistemas de gestión de residuos en México*

Uno de los principales desafíos en la integración de la IA en las prácticas de gestión de residuos en México es la disponibilidad y calidad de los datos. Datos precisos y completos son esenciales para entrenar los algoritmos de IA y generar ideas significativas. Sin embargo, en el contexto mexicano existen fuertes limitaciones en cuanto a la recopilación, organización y accesibilidad, por lo cual se debe tener en cuenta las necesidades y la infraestructura únicas de los municipios mexicanos. México se caracteriza por ser un país con una gran diversidad cultural, por lo que cada municipio presenta diferencias uno del otro y se pueden reflejar en los sistemas de gestión de residuos, recursos y capacidades. Adaptar los modelos de IA a estos contextos específicos es esencial para garantizar su efectividad y practicidad. Esta adaptación implica personalizar los algoritmos y tecnologías de IA para abordar

los desafíos específicos de gestión de residuos que enfrentan los municipios mexicanos, se requiere comprender la composición local de los residuos, los métodos de recolección, las redes de transporte y las instalaciones de disposición final.

Otro desafío en el contexto mexicano es la necesidad de construir experiencia técnica y capacidad local para la implementación de IA en las prácticas de gestión de residuos, ya que desarrollar y mantener soluciones de IA requiere profesionales capacitados que comprendan tanto los principios de gestión de residuos como las tecnologías de IA.

Para abordar este desafío, se deben emprender iniciativas para proporcionar programas de capacitación y desarrollo de capacidad en IA para profesionales de la gestión de residuos en México. La colaboración entre instituciones académicas, agencias gubernamentales y socios de la industria puede facilitar la transferencia de conocimientos y el desarrollo de habilidades. Mediante la inversión en programas de educación y capacitación, México puede fomentar una fuerza laboral talentosa equipada con las habilidades técnicas necesarias para implementar y mantener tecnologías de IA en las prácticas de gestión de residuos.

### *Aplicación de la inteligencia artificial en México y América Latina*

En la literatura mexicana y latinoamericana se ha encontrado ejemplos de la aplicación de la IA en la gestión de residuos sólidos urbanos, si bien la literatura no es extensa, los aportes que se ejemplifican a continuación son una base de la aplicación de la IA en distintas ramas de la gestión de residuos sólidos urbanos. Un ejemplo de ello es el trabajo de Calderón-Casanova *et al.*, (2018), donde desarrollaron un modelo de inteligencia artificial para la predicción de la generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México, para ello crearon una base de datos con información pública de instituciones gubernamentales, representadas en 39 variables, con ello se alimentó el algoritmo de aprendizaje para generar el valor de predicción. Como parte de los resultados, se identificaron 10 variables generales, con las cuales se puede realizar la predicción de la generación de residuos sólidos, y que, además, se pueden emplear en los demás municipios de México, siempre y cuando se cuente con información para dichas variables.

Montalvo Hernández (2021) desarrolló una aplicación para la optimización y medición de la eficiencia de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el estado de Tamaulipas, para ello el modelo de aplicación albergó una base de datos de mapas de la zona de recolección, personal operativo, camiones o unidades de recolección, y días de recolección. Se compararon datos de la recolección de residuos en la misma zona en fechas diferentes y con métodos diferentes: recolección sin la aplicación y recolección con la aplicación, fue evidente que con la aplicación se cubre el 100% de la zona en un menor tiempo y con una menor cantidad de residuos.

Por otra parte, el trabajo desarrollado por Gómez y Tamayo (2022), en una escuela en Colombia, en donde mediante el uso de *Auto Teachable Machine de Google* crearon un modelo de red neuronal para la clasificación de residuos sólidos urbanos mediante imágenes, contaron con tres clasificaciones y cada una fue alimentada con una base de datos de más de 500 imágenes. Este modelo permitía a los estudiantes situar el residuo a desechar frente a una cámara para la captura de imagen y su posterior análisis en la red neuronal, y con ello indicar al usuario en que contenedor desechar el residuo.

Por último, Chávez Salinas (2022), llevó a cabo el diseño y desarrollo de un robot móvil utilizando visión artificial para la identificación y recolección de botellas de plástico en las playas de Perú, mediante el uso de Machine Learning y red neuronal convolucional, que fueron entrenadas durante simulaciones en el reconocimiento de imágenes y agrupación de estas en grupos, como resultado el modelo de robot reconoce las botellas y se acerca a ellas evadiendo obstáculos durante su trayectoria hasta recolectar la botella.

## Limitaciones del uso de la inteligencia artificial

La implementación de sistemas basados en IA requiere una inversión económica significativa en tecnología y capacitación. Esto puede ser un obstáculo para muchas regiones y municipios con recursos limitados, especialmente aquellos en áreas rurales y de bajos ingresos. La falta de financiamiento y acceso a tecnología avanzada puede dificultar la adopción generalizada de estas soluciones. Además, la integración de la

IA en la gestión de residuos requiere una infraestructura sólida y una conectividad confiable. En áreas donde la infraestructura de comunicaciones y la cobertura de Internet son deficientes, la implementación de sistemas basados en IA puede ser difícil. Esto puede limitar la aplicabilidad de estas soluciones en todo el país y dificultar la estandarización de las prácticas de gestión de residuos.

Otro desafío es la necesidad de adaptar las soluciones basadas en IA a las características específicas de cada región y municipio. México es un país diverso con flujos de residuos variables, condiciones geográficas diferentes y aspectos socioeconómicos distintos. Por lo tanto, se requiere un enfoque personalizado y una comprensión profunda de las necesidades y desafíos locales para implementar soluciones efectivas.

## Conclusiones

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la gestión de residuos sólidos en México ofrece numerosas oportunidades para mejorar la eficiencia, aumentar las tasas de reciclaje, reducir el impacto ambiental y el aprovechamiento de recursos económicos y humanos.

La implementación de la IA en la gestión de residuos tiene beneficios que no solo estandarizarían las prácticas de gestión, sino que las mejorarían, sin embargo, las diferentes condiciones económicas y geográficas de cada región y municipios dificultan su implementación. Es de destacarse que, si bien la IA puede llegar a ser una herramienta en la gestión de residuos, su éxito debe involucrar la educación y conciencia ambiental para la población.

## Referencias

- Akdaş HŞ, Doğan B, Bas A, Uslu BÇ. (2021). Vehicle route optimization for solid waste management: a case study of maltepe, Istanbul. In: 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI): 1-6. DOI: 10.1109/ECAI52376.2021.9515129.
- Calderón-Casanova E, López-Ortíz M, Galán P, Villatoro-Tello E, García-Aguilar R, García-Parra B. (2018). Predicción de la generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México. *Research in Computing Science* 147(5): 65-77.

- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023, 08 de mayo). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Ceballos Pérez S, Brambila Paz JJ, Pérez Cerecedo V. (2022). Residuos sólidos urbanos y economía circular en Pachuca, Hidalgo, México. *Acta Universitaria* 32: e3437. DOI: 10.15174/au.2022.3437.
- Chávez Salinas MA. (2022). Desarrollo de un robot móvil con inteligencia artificial para recolectar botellas de plástico. Pontificia Universidad Católica del Perú, MSI tesis, p. 135.
- Chaudhari MS, Patil B, Raut V. (2019). "IoT based Waste Collection Management System for Smart Cities: An Overview," 2019 3rd International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, pp. 802-805. DOI: 10.1109/ICCMC.2019.8819776.
- Du W, Zheng J, Li W, Liu Z, Wang H, Han X. (2022). Efficient recognition and automatic sorting technology of waste textiles based on online near infrared spectroscopy and convolutional neural network. *Resour Conserv Recycl* 180: 106157. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106157.
- ECOCE. "Cifras y Estadísticas". (2020). <https://www.ecoce.mx/cifras-y-estadisticas>.
- Fang B, Yu J, Chen Z *et al.* (2023). Artificial intelligence for waste management in Smart cities: a review. *Environ. Chem. Lett* 21: 1959-1989. DOI: 10.1007/s10311-023-01604-3.
- Gómez Vargas DL, Tamayo Saavedra AK. (2022). Clasificador de residuos sólidos para la i.e. Juan XXIII del municipio de Algeciras con aplicación de Machine Learning. *Revista Sennova: Revista del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación* 6(1): 11-24. DOI: 10.23850/23899573.5409.
- Hosseini Bamakan SM, Malekinejad P, Ziaei M. (2022). Towards blockchain-based hospital waste management systems; applications and future trends. *Journal of Cleaner Production* 349: 131440. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131440.
- Hua Yu K, Zhang Y, Li D, Montenegro-Marin CE, Malarvizhi Kumar P. (2021). Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review* 86: 106492. DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106492.
- Ihsanullah I, Alam G, Jamal A, Shaik F. (2022). Recent advances in applications of artificial intelligence in solid waste management: A review. *Chemosphere* 309(1): 136631. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136631.
- Juárez de la Rosa JA, Medina Martínez H, Taboada González P, Aguilar Virgen Q, Márquez Benavides L. (2023). Gobernanza ambiental en la gestión de residuos sólidos de los municipios en Oaxaca, México. *Acta Universitaria* 33: e3704. DOI: 10.15174.au.2023.3704
- Kaza S, Yao LC, Bhada-Tata P, Van Woerden F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317>
- Kumar NM, Mohammed MA, Abdulkareem KH, Damasevicius R, Mostafa SA, Maashi M S, Chopra SS. (2021). Artificial intelligence-based solution for sorting COVID related medical waste streams and supporting data-driven decisions for smart circular economy practice. *Process Safety and Environmental Protection* 152: 482-494. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.026.
- Montalvo Hernández MA. (2021). Aplicación automatizada para la optimización y medición del Sistema Integral de recolección de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Reynosa, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma de Tamaulipas. MS. pp. 72.
- Moreno Padilla R. (2019). La llegada de la inteligencia artificial a la educación. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información* 7: 260-270. DOI: 10.36825/RITI.07.14.022.
- Muñoz Cruz RC, Morales Calderón JR. (2023). El impacto ambiental de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y la economía circular en México. *Denarius* 1(44): 205-233.
- Li N, Chen Y. (2023). Municipal solid waste classification and real-time detection using deep learning methods. *Urban Climate* 49: 101462. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101462.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2018) "Informe de la situación de medio ambiente en México, Capítulo 7, Residuos", <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2020). "Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2020", URI:

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

- Seredkin AV, Tokarev MP, Plohih IA, Gobyrov OA, Markovich DM. (2019). Development of a method of detection and classification of waste objects on a conveyor for a robotic sorting system. *Journal of Physics: Conference Series* 1359 012127. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012127.
- Sousa J, Rebelo A, Cardoso JS. (2019). Automation of waste sorting with deep learning. In: 2019 XV Workshop de Visão Computacional (WVC): 43-48. DOI: 10.1109/WVC.2019.8876924.
- Sulemana A, Donkor EA, Forkuo EK, Oduro-Kwarteng S. (2018). Optimal routing of solid waste collection trucks: a review of methods. *J Eng* 2018: 4586376. DOI: 10.1155/2018/4586376.
- Thumiki M, Khandelwal A. (2022). Real-time mobile application for classifying solid waste material into recyclable and non-recyclable using Image recognition and convolutional neural network. *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECs)*. 1-6. DOI: 10.1109/SCEECs54111.2022.9740863.
- Yigitcanlar T, Cugurullo F. (2020). The sustainability of artificial intelligence: an urbanistic viewpoint from the lens of smart and sustainable cities. *Sustainability* 12: 8548. DOI: 10.3390/su12208548.
- Zhang S, Chen Y, Yang Z, Gong H. (2021). Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification. *Resour Conserv Recycl* 169: 105543. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105543.