

Mejora del Compostaje Comunitario mediante Sensores IoT para una Gestión Eficiente de Residuos Orgánicos en la Ciudad de México

Andrea Zetina-González¹, Nadia E. González-Pedraza¹, Andre Salgado-Mena¹, Zizilia Zamudio-Beltrán²

¹Universidad La Salle México, Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.

²Universidad La Salle México, Vicerrectoría de Investigación. Ciudad de México, México.
andreazetina@lasallistas.org.mx, nadia.gonzalez@lasallistas.org.mx,
andre.salgado@lasallistas.org.mx, zizilia.zamudio@lasalle.mx

Resumen. Se aborda la problemática de la gestión de residuos sólidos en la Ciudad de México, donde no existe un control adecuado sobre los residuos que ingresan y salen de las plantas de composta. Esto genera inconsistencias en los reportes y afecta la eficiencia operativa. El objetivo del proyecto es implementar sensores IoT para optimizar el monitoreo de los residuos orgánicos y el proceso de compostaje, mejorando la calidad del abono y el tiempo de procesamiento. Mediante la revisión de proyectos internacionales en Grecia y Colombia, se demuestra que el uso de sensores IoT para controlar variables como la temperatura, humedad y pH puede reducir significativamente el tiempo necesario para completar el compostaje y asegurar una mayor eficiencia en la operación de las plantas. Los resultados indican que la adopción de esta tecnología no solo mejora la gestión de los residuos, sino que también contribuye a la sostenibilidad urbana, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Como conclusión, se sugiere la capacitación del personal y la realización de estudios piloto para evaluar la viabilidad de implementar este sistema en todas las plantas de composta de la ciudad.

Palabras Clave: Gestión de residuos orgánicos, Planta de composta, Tecnología IoT.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

De acuerdo con el Banco Mundial (2018) y el informe What a waste 2.0, anualmente se generan cerca de 2010 millones de toneladas de desechos y su manejo inadecuado desencadena diversos problemas ambientales, de salud y económicos (Banco Mundial, 2018; De Anda-Trasviña, 2021).

En este contexto, la Ciudad de México, ante el desafío de la gestión de residuos sólidos, éstos se recolectan, se clasifican y se envían a distintos destinos. Los residuos orgánicos son enviados a plantas de composta, los reciclables a plantas de selección, los residuos con bajo potencial de aprovechamiento a plantas de compactación para ser usados como combustibles, y, por último, los residuos muy mezclados son enviados a disposición final (Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2022, 2022, p. 155).

En 2022, el 91.46% de los residuos recolectados en la ciudad fueron generados por hogares, pequeños comercios, mercados, y por el barrido manual y mecánico de

vialidades y áreas comunes. Sin embargo, uno de los principales problemas radica en que no existe un control uniforme sobre los residuos que ingresan a las plantas de composta, ni un seguimiento adecuado de los residuos procesados o la calidad del abono resultante. Esto provoca inconsistencias en la información reportada, lo que dificulta la toma de decisiones operativas y de planificación. En el año 2022, la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE) reportó enviar diariamente las cantidades de residuos tal como se muestra en la Figura 1 (Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2022, 2022, p. 157).

Como se observa en la figura 1, el principal destino que tienen los residuos que llegan a las estaciones de transferencia son los sitios de disposición final, lugares desde los cuales no reciben ningún tipo de valorización, mientras que el 39.88% de los residuos son enviados a diferentes sitios para potenciar su aprovechamiento. Así, se puede observar que una parte importante del aprovechamiento de residuos en la ciudad se lleva a cabo en las plantas de composta, donde los residuos orgánicos se transforman en abono a través de procesos biológicos que involucran la participación de microorganismos aerobios (Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2022, 2022, p. 157).

En 2022, la Ciudad de México contaba con ocho plantas de composta: tres administradas por el gobierno central y cinco por las alcaldías de Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta y Xochimilco. Estas plantas ofrecen múltiples beneficios, como la reducción de costos al evitar la disposición final de residuos, la producción de abono útil para la agricultura, la disminución del volumen y peso de los residuos, la reducción de emisiones de metano, y la generación de empleos. Sin embargo, la falta de un sistema que permita monitorear en tiempo real los residuos que ingresan y los que salen de las plantas de composta, junto con la falta de datos clave sobre el proceso de compostaje, afecta la consistencia en los reportes y la eficiencia en la operación (Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2022, 2022, p. 189).

El desconocimiento de datos clave en estas plantas, debido a cambios operativos frecuentes, podría mitigarse con la implementación de sensores IoT y el uso de bases de datos en SQL, lo que permitiría una gestión y seguimiento más eficiente de los residuos procesados. Este descontrol afecta directamente la calidad y el tiempo de procesamiento del compost, lo que puede ocasionar que el abono no esté listo cuando se necesita o que la calidad del producto final no sea la adecuada. En este contexto, la implementación de sensores IoT para abordar esta problemática se vincula estrechamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Por ejemplo, el ODS 9 promueve la innovación y el desarrollo de infraestructuras sostenibles, alineándose con la adopción de tecnologías IoT para optimizar este proceso. El ODS 11, que busca ciudades más sostenibles, está relacionado con la gestión adecuada de residuos, reduciendo la contaminación y mejorando el entorno urbano. Por último, el ODS 12, enfocado en la producción y el consumo responsables, se asocia con la valorización de los residuos orgánicos a través del compostaje.

2 Objetivo

Mejorar el monitoreo y la gestión de residuos orgánicos en las plantas de composta de la Ciudad de México mediante la implementación de sensores IoT, con el fin de mejorar la eficiencia del compostaje y contribuir a la sostenibilidad urbana.

3 Propuesta teórico-metodológica

En Colombia, se implementó un proyecto de compostaje a pequeña y mediana escala con 3,500 sistemas, logrando aprovechar 1,500 toneladas de residuos orgánicos al año, generando 600 toneladas de composta y evitando la emisión de 3,000 toneladas de CO₂ (Earthgreen, 2020). Sin embargo, debido a la falta de monitoreo de factores como temperatura, humedad, pH, aireación y tipo de residuos, el tiempo de maduración del compost es más prolongado. En general, este proceso puede durar entre 2 y 4 meses, pero alcanzar el tiempo mínimo de 2 meses es difícil sin presentar condiciones ideales (eOrganic, 2022).

Para acelerar el compostaje y evitar la putrefacción o el crecimiento de organismos no deseados, es crucial mantener las temperaturas adecuadas: entre 15-45°C en la fase de latencia, 45-70°C en la fase termófila, y por debajo de 40°C en la fase de maduración. La humedad debe estar entre el 40% y el 60%, el pH entre 6.5 y 8.5, además de contar con una buena aireación en el material (Earthgreen, 2020; eOrganic, 2022).

Para lograr estas condiciones, se propone implementar el uso de sensores en plantas de México. Estos sensores, conectados a una placa ESP32, enviarían los datos a un servidor local en una Raspberry Pi a través de WiFi. La información se almacenaría en una base de datos SQL y sería accesible desde cualquier navegador web en la red local, permitiendo monitorear el estado del compost en tiempo real y activar alertas para la intervención humana en caso de desviaciones en los valores (José et al., 2021, pp. 25, 33 - 34).

A nivel mundial, se han desarrollado proyectos combinando compostaje con sensores. Por ejemplo, en Grecia, al monitorear y controlar la humedad y temperatura del compost y del aire, se redujo en un 30% el tiempo necesario para completar el proceso, evitando la presencia de patógenos y semillas no deseadas (Nikoloudakis et al., 2018, p. 14). Aunque no se verificó si los valores medidos por los sensores eran precisos, en un proyecto en Indonesia se validaron los datos de sensores de pH y temperatura, obteniendo un margen de error menor al 0.5%. También, se confirmó la fiabilidad del sistema al no haber pérdida de conectividad y un retardo promedio de solo 4 segundos (Mujiyanti et al., 2022, pp. 53-54.).

4 Discusión de resultados

Tomando como referencia los proyectos desarrollados por la Universidad Politécnica de Valencia (José et al., 2021), el Instituto Educativo Tecnológico de Creta (Nikoloudakis et al., 2018) y el Instituto de Tecnología en Surabaya (Mujiyanti et al., 2022), se ha demostrado que la incorporación de sensores IoT para el monitoreo del compostaje aporta beneficios significativos. Estos sensores, cada uno con características y costos específicos, permiten un control preciso de variables críticas como la temperatura, la humedad y el pH, lo que optimiza el tiempo de procesamiento y mejora la calidad del compost producido. La Tabla 1 muestra la relación entre los sensores utilizados, sus funciones y costos, proporcionando una guía clara para estimar el costo total de implementación de estos proyectos en la Ciudad de México.

En el caso de las plantas de compostaje de la Ciudad de México, la implementación de sensores permitiría un control constante sobre las condiciones del proceso, optimizando la velocidad de compostaje. La cantidad y tipo de sensores necesarios dependerá de las características específicas de cada planta y del área a monitorear, por lo que sería necesaria una evaluación en sitio para determinar los requerimientos exactos. No obstante, debido al bajo costo de muchos de estos sensores, incluso si se requiere una mayor cantidad para cubrir áreas más extensas, el aumento en los costos no sería significativo.

Además, al investigar los costos y tipos de sensores empleados en proyectos previos, permitió estimar los materiales necesarios para implementar el proyecto en la Ciudad de México. Aunque una implementación a gran escala requeriría más sensores y otros componentes adicionales de control y automatización industrial, como los PLCs (controladores lógicos programables), se ha observado que la inversión en estos elementos no es tan elevada como podría pensarse. Los costos y características del PLC propuesto se detallan en la Tabla 2. Sin embargo, dado los buenos resultados obtenidos en los proyectos previamente señalados, se podría seguir utilizando la placa Raspberry Pi, que tiene un costo más bajo, aunque ofrece menor fiabilidad en su funcionamiento.

Los resultados de estos proyectos indican que la implementación de esta tecnología no solo es viable, sino que tampoco representa un gasto excesivo para el Gobierno de la Ciudad de México. Así, la tecnología IoT permitiría un monitoreo en tiempo real para mejorar significativamente la eficiencia en la gestión de residuos orgánicos.

Este enfoque contribuye directamente al ODS 9, ya que fomenta la adopción de tecnologías innovadoras que mejoran la infraestructura de las plantas de composta, haciéndolas más sostenibles y eficientes. Asimismo, al reducir la contaminación y mejorar el entorno urbano mediante una gestión más eficiente de los residuos, esta tecnología apoya el ODS 11. Finalmente, al facilitar un uso más responsable de los recursos y maximizar la reutilización de residuos orgánicos, se alinea con el ODS 12, promoviendo un modelo de producción y consumo más sostenibles.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

De acuerdo con los datos presentados en esta investigación, se puede concluir que la implementación de sensores IoT en las plantas de composta de la Ciudad de México puede optimizar el monitoreo de residuos orgánicos, mejorar la eficiencia del proceso de compostaje y contribuir de manera significativa a la sostenibilidad urbana. Estos hallazgos subrayan cómo la tecnología puede transformar la gestión de residuos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9, 11 y 12.

Para futuras investigaciones, se recomienda la realización de estudios piloto en las plantas de composta de la ciudad, con el fin de evaluar la eficacia de distintos tipos de sensores y su integración con sistemas de gestión de datos en tiempo real. Asimismo, sería conveniente explorar tecnologías complementarias, como la inteligencia artificial, para predecir la cantidad de residuos entrantes y así optimizar el proceso de compostaje.

Uno de los posibles desafíos identificados es la falta de conocimiento sobre el manejo de los sensores IoT y, en el futuro, de la IA. Por ello, es fundamental considerar la capacitación del personal de las plantas de composta para garantizar un manejo adecuado de estas tecnologías y asegurar su correcto funcionamiento.

6 Agradecimientos

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo, así como a todas las personas y organizaciones que, sin ser coautoras, contribuyeron de manera significativa mediante sus observaciones y recomendaciones para mejorar el documento. Su valiosa ayuda permitió el uso de equipo y recursos esenciales para la realización de este proyecto.

7 Referencias

1. 6ED1052-1CC08-0BA1 Siemens. (s. f.). Recuperado 16 de septiembre de 2024, de https://mx.wiautomation.com/siemens/plc-sistemas/plc-sistemas/6ED10521CC080BA1?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=MX_pmax_new_insert&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwrp-3BhDgARIsAEWJ6SwI-vT6bzzQA95tgLeCDjj-JrG8Ro8HpZKqy7vi95c8KzsfL2boPC8aAjiHEALw_wcB
2. DHT11- Sensor de temperatura y humedad (DHT11). (s/f). Electrónica Steren México. Recuperado el 11 de septiembre de 2024, de <https://www.steren.com.mx/sensor-de-temperatura-y-humedad.html?srsltid=AfmBOoqQkdeVE4jAH2wnwOpnhwOre-35fiEMH6Z3bsnRy7XScO6Oo3a->
3. DS18B20 - DS18B20 Sensor de temperatura Digital. (s/f). UNIT Electronics. Recuperado el 11 de septiembre de 2024, de https://uelectronics.com/producto/ds18b20-sensor-de-temperatura-digital/?srsltid=AfmBOoqIrCabNrYs9Bx6azzelltELEWJE5gxvD8hmf67ZY2C_qWErW13
4. EarthGreen. (2020, 17 junio). *EarthGreen*. Recuperado 9 de septiembre de 2024, de <https://www.earthgreen.com.co/>
5. eOrganic. (2022). *Preparación y uso de compost para la agricultura orgánica*. Recuperado 8 de septiembre de 2024, de <https://eorganic.org/node/35223>

6. GSL Industrias. (2024, 1 julio). *¿Qué es un PLC y cómo funciona?* Industrias GSL. Recuperado 16 de septiembre de 2024, de <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/que-es-un-plc-y-como-funciona?srsId=AfmBOoqmSS79JujvQfm9gR7nSOkdKkkVjJUZVrq4vX-4zYpgZsRMMIAi>
7. Hc-sr04 Sensor Ultrasonico Hc-sr04. (s/f). Com.mx. Recuperado el 11 de septiembre de 2024, de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-603602115-sensor-ultrasonico-hc-sr04-_JM
8. Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2022. (2022). En *Gobierno de la Ciudad de México - Secretaría del Medio Ambiente*. Recuperado 1 de septiembre de 2024, de https://www.se-dema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/IRS_2022_Completo.pdf
9. Joan. (2019, 30 abril). *PLC para Raspberry Pi V3*. Electrónica Joan. Recuperado 16 de septiembre de 2024, de <https://electrojoan.com/plc-para-raspberry-pi/?amp=1>
10. José, G. S. F (2021). *Diseño e implementación de un sistema IoT mediante la plataforma ESP32 para la automatización del proceso de compostaje de residuos orgánicos domésticos. [Trabajo final de máster, Universidad Politécnica de Valencia]*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/174747#>
11. MQ-4 Mq-4 Modulo Sensor Detector Gas Natural Metano Carbon Mq4. (s/f). Com.mx. Recuperado el 11 de septiembre de 2024, de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-774365114-mq-4-modulo-sensor-detector-gas-natural-metano-carbon-mq4-_JM?matt_tool=60196827&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=19660053790&matt_ad_group_id=162652945892&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=686732496221&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=164788322&matt_product_id=MLM774365114&matt_product_partition_id=2291870219994&matt_target_id=aud-2184903507963:pla-2291870219994&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw3P-2BhAEEiwA3yPhwE-oQpN35ALe6e6QZZIUJSDkzUJkKYUXQnLmYpU7LcarYnXIV8a6zbhoCbUQQAvD_BwE
12. Mujiyanti, S. F., Aisyah, P. Y., Salsabilla, A. F., Darmawan, T. R., & Rohid, A. (2022, 31 octubre). *IoT-based for Monitoring and Control System of Composter to Accelerate Production Time of Liquid Organic Fertilizer*. Mujiyanti | IPTEK The Journal Of Engineering. https://iptek.its.ac.id/index.php/joe/article/view/14081/pdf_20
13. Nikoloudakis, Y., Panagiotakis, S., Manios, T., Markakis, E., & Pallis, E. (2018). Composting as a Service: A Real-World IoT Implementation. *Future Internet*, 10(11), 107. <https://doi.org/10.3390/10110107>
14. PH-4502C Sensor de PH Liquido con electrodo E201-BNC. (s/f). UNIT Electronics. Recuperado el 11 de septiembre de 2024, de <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/>
15. *Raspberry Pi 4 modelo B 4GB RAM*. (s. f.). Mercado Libre. Recuperado 16 de septiembre de 2024, de https://www.mercadolibre.com.mx/raspberry-pi-4-modelo-b-4gb-ram/p/MLM33005781?item_id=MLM3073303346&from=gshop&matt_tool=64931288&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=19652627751&matt_ad_group_id=159049214602&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=686686757026&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=735123861&matt_product_id=MLM33005781-product&matt_product_partition_id=2291870220194&matt_target_id=aud-2039726218771:pla-2291870220194&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwrp-3BhDgARIsAEWJ6SyjUA5FB1ZarzWisKQnYRj4iBYyQOw4AoWP5fLuGlcajvI6G43Yt28aAhMJEALw_wcB

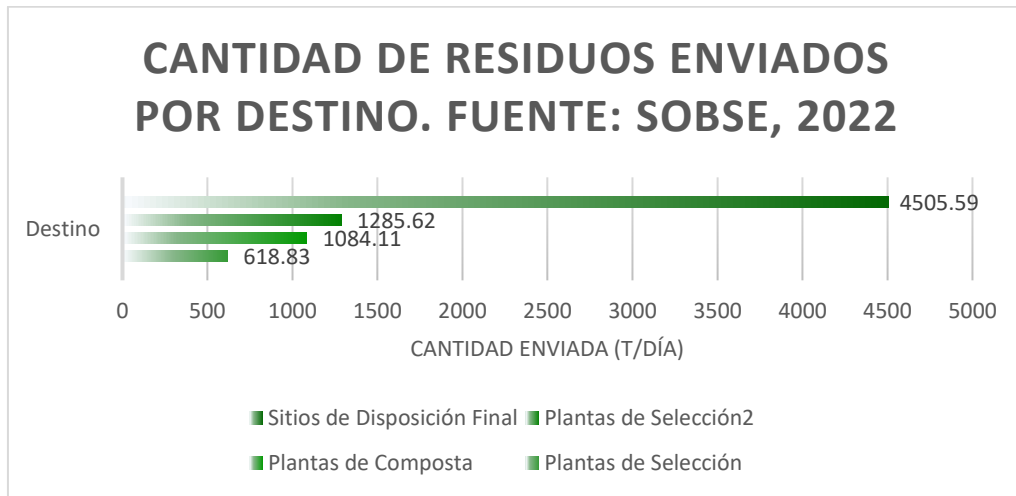


Figura 1. Cantidad de residuos enviados por destino de acuerdo con la secretaría de Obras y Servicios de la CDMX. Fuente. SOBSE, 2022.

Tabla 1. Sensores utilizados en la implementación de composteras IoT junto con su función y su costo en México. Fuente. Elaboración propia.

Sensor	Función	Costo
Sensor de Humedad y Temperatura Ambiental (DHT11)	Mide la humedad y temperatura ambiental.	\$49.00
Sensor de Temperatura del Compost (DS18B20)	Mide la temperatura dentro del compost.	\$11.00
Sensor de Metano (MQ4)	Detecta la presencia de gas metano.	\$66.00
Sensor de Ultrasonidos (HC-SR04)	Mide el nivel de la composta en el contenedor.	\$49.00
Sensor de PH 4502C análogo	Mide el valor del pH de la composta.	\$398.00

Tabla 2. Comparativa entre una placa Raspberry Pi y un PLC industrial, junto con su función y su costo en México. Fuente: Elaboración Propia.

Característica	Raspberry Pi	PLC Industrial (6ED1052-1CC08-0BA1)
Función	Microordenador de bajo costo que permite realizar desde la programación y el control de dispositivos electrónicos hasta el desarrollo de proyectos de automatización	Control de procesos industriales y automatización.
Costo	1330.00 MXN	2770.52 MXN
Entradas/Salidas	Hasta 26 pines GPIO, requiere circuitos adicionales para conexiones industriales.	Diseñado para manejar múltiples señales de entrada/salida, robusto para entornos industriales.
Entorno de uso	Ideal para proyectos educativos y prototipos; no siempre adecuado para entornos industriales sin modificaciones.	Diseñado para entornos industriales, resistencia a vibraciones y condiciones adversas.
Ventajas	Bajo costo, flexibilidad	Alta fiabilidad, soporte técnico especializado,